

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**



**MAESTRIA EN GEOMATICA ORIENTADA**

**AL ORDENAMIENTO TERRITORIAL**

**TITULO:**

**EVALUACIÓN DE METODOS HEURISTICOS Y MATEMATICOS PARA LA DETERMINACION  
DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

**Proyecto de graduación previo a la obtención del  
Grado de Magister en Geomática**

**Autor:**

**ING. DIEGO ALEJANDRO PARRA GONZALEZ**

**DIRECTOR:**

**ING. PABLO FERNANDO VANEGAS PERALTA. PHD**

**NOVIEMBRE - 2013**

**CUENCA- ECUADOR**



## Resumen

El propósito de este estudio es la evaluación de modelos heurísticos y matemáticos que puedan ser utilizados para la determinación del potencial de energía distribuida con energía fotovoltaica, para este objetivo se ha utilizado la información disponible en instituciones públicas, privadas y de libre acceso en la red, siendo homogenizadas en su formato y extensión.

La zona de estudio escogida corresponde al territorio del Cantón Cuenca, para análisis de radiación solar en el mes de Septiembre del 2001, fuentes de información como: Instituto Geográfico Militar, CONELEC, repositorios de información satelital de la zona disponibles en la web, anuarios meteorológicos del INAMHI, Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) - Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica fueron utilizados. Los datos fueron sometidos a análisis estadísticos y geo-estadísticos para determinar su comportamiento y fiabilidad de uso, determinando variables de tendencia central y análisis de semivariogramas, los métodos de: Distancia Inversa Ponderada, Kriging Universal y Vecino Natural fueron utilizadas. El modelo matemático utilizado es el propuesto por Suri, M., and J. Hofierka para implementar en Sistemas de Información Geográfica incluyendo el análisis estadístico, mientras que el heurístico corresponde a la propuesta desarrollada por Vanegas P., Cattrysse D., Van Orshoven J. para análisis de zonas similares en mapas raster y Autómatas celulares sin dependencia de información adicional. Los resultados obtenidos fueron comparados con los similares del Atlas Solar, siendo uno de los limitantes de este estudio proyectos similares con análisis de información existente en la zona, concluyendo que la información existente y los métodos utilizados son fiables para la determinación de zonas potenciales para generación distribuida, queda como planteamiento para futuras investigaciones análisis multicriterio que involucren múltiples variables y desarrollo de escenarios para la búsqueda de zonas de generación, sean edificios o áreas de emplazamiento.

Palabras clave: radiación solar directa, Hisohelias, Atlas Solar Ecuador, Kriging.



## Abstract

The purpose of this study is to evaluate heuristics and mathematical models that can be used for Determining the Potential of Distributed Energy with Photovoltaics, for this purpose used the information available in public, private , freely available on the net, being homogenized in format and length. The chosen study area corresponds to the territory of the Canton Cuenca, for analysis of solar radiation in the month of September 2001 , sources of information such as: Instituto Geográfico Militar, CONELEC , satellite data repositories of the area available on the web, meteorological yearbooks INAMHI, Consejo Nacional de Electricidad ( CONELEC ) - Atlas Ecuador Solar Electricity Generation purposes were used. The data were subjected to statistical analysis and geo -statistics to determine their performance and reliability in use established variables of central tendency and semivariogram analysis, methods : Inverse Distance Weighting , Universal Kriging and Natural Neighbor were used.

The mathematical model used is that proposed by Suri , M., and J. Hofierka to implement in Geographic Information Systems including statistical analysis, while the heuristic corresponds to the proposal developed by P. Vanegas , Cattrysse D., Van Orshoven J. for analysis for analysis of similar areas in raster maps, and methods as Celular Automata. The results were compared with similar Solar Atlas, one of the limitations of this study is similar projects with existing information analysis in the area, concluding that existing information and methods used are reliable for determining potential areas for generation distributed approach remains as future research involving multiple criteria analysis variables and development stages for generating search areas, buildings or areas are siting.

Keywords: Direct solar radiaton, Hisolehias, Solar Map Ecuador, Kriging



## INDICE

Resumen.....	1
Abstract .....	3
CAPITULO I: INTRODUCCION .....	8
1.1 Generalidades .....	8
1.2 Justificativos .....	9
1.3 Objetivos .....	11
1.3.1 Objetivo General:.....	11
1.3.2 Objetivos Específicos:.....	11
1.4 Limitaciones .....	11
1.5 Hipótesis.....	12
CAPITULO II .....	13
2.1 ASPECTOS GEOGRAFICOS - GEOMATICA .....	13
2.1.1 Forma de la tierra .....	16
2.2 SOFTWARE .....	18
2.3 ENERGÍA RENOVABLE .....	18
2.3.1 ENERGIA SOLAR .....	20
2.3.2 Conceptos fundamentales sobre energía solar .....	21
2.3.3 Tipos de radiación solar .....	23
2.3.3.1 Radiación normal extraterrestre.....	24
2.3.3.2 Radiación solar terrestre .....	26
2.3.3.3 Medición de la energía solar incidente sobre el suelo .....	27
2.4 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	28
2.4.1 Sistemas descentralizados .....	30
2.4.2 Centrales de potencia .....	31
2.5 Análisis Imágenes Satelitales .....	33
2.5.1 Corrección de imágenes.....	34
2.5.1.1 Geo-referenciación y Corrección geométrica .....	34
2.5.1.2 Corrección radiométrica .....	36
2.6 Materiales.....	37



2.6.1 Información Secundaria.....	37
2.6.1.1 Base datos solar del Ecuador .....	38
2.6.1.2 Cartografía temática .....	39
2.6.1.3 Imágenes satelitales .....	39
<b>2.6.1.4 Registros meteorológicos .....</b>	<b>40</b>
<b>2.6.1.5 Modelo digital de elevaciones .....</b>	<b>42</b>
<b>2.7 Métodos de estimación de Radiación Solar .....</b>	<b>43</b>
2.7.1 Modelo Digital del Terreno .....	44
<b>2.7.2 Métodos Heurísticos.....</b>	<b>52</b>
<b>2.7.2.1 Análisis de imágenes satelitales .....</b>	<b>54</b>
<b>2.7.2. 2 Corrección geométrica.....</b>	<b>55</b>
2.8 Métodos de interpolación.....	58
2.8.1 Distancia Inversa Ponderada (IDW) .....	59
2.8.2 Metodología Kriging .....	60
2.8.2.1 Kriging Ordinario.....	61
2.8.3 Vecino Natural.....	64
CAPITULO III .....	66
3.1 Estaciones meteorológicas - Atlas solar .....	66
3.2 Modelo digital de elevaciones.....	72
3.2.1 Métodos Interpolación.....	74
3.2.1.1 Duración de horas sol.....	74
3.2.1.2 Radiación solar .....	79
3.3 Modelo heurístico.....	84
3.4 Generación Distribuida.....	85
IV CONCLUSIONES .....	86
V. BIBLIOGRAFIA .....	88



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, **Diego Alejandro Parra González**, autor de la tesis "EVALUACIÓN DE METODOS HEURISTICOS Y MATEMATICOS PARA LA DETERMINACION DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 25 Noviembre del 2013

Ing. Alejandro Parra González.  
0102808573

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Diego Alejandro Parra González, autor de la tesis “EVALUACIÓN DE METODOS HEURISTICOS Y MATEMATICOS PARA LA DETERMINACION DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Master en Geomática. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 25 Noviembre del 2013

  
Alejandro Parra González  
0102808573

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



## CAPITULO I: INTRODUCCION

### 1.1 Generalidades

El aprovechamiento energético solar por medio de sus diversas fuentes representa una alternativa actual para reducir la dependencia de aquellos sistemas que consumen grandes cantidades energéticas y tienen períodos de servicio limitados. En este sentido la radiación solar representa un factor importante de beneficio ya que su transformación puede suplir grandes necesidades actuales de demanda de energía eléctrica.

El beneficio solar representado como radiación que llega a la superficie de la tierra (directa, difusa) es utilizado por medio de la conversión en electricidad sin partes móviles ni combustible adicional posee una serie de características que la hacen insustituible en algunas aplicaciones: electrificación rural, aplicaciones espaciales, etc. El consumo energético en el ámbito doméstico representa entre el 20% y 30% de las necesidades energéticas de los países desarrollados quienes han promocionado la generación de la energía fotovoltaica que constituye, hoy en día, alternativas de solución en las proximidades urbanas como reemplazo de las convencionales. (Gustavo Nofuentes, Julio 2000).

Sin embargo existen asentamientos humanos dispersos que no tiene acceso a las facilidades de servicios básicos, entre ellos la energía eléctrica, llegando a necesitar de grandes inversiones o gestiones para poder contar con ello, frente a esta situación la concepción de sistemas aislados de aprovechamiento solar resultan una solución oportuna de gran potencial capaz de satisfacer la necesidad energética.

La caracterización espacial de las energías renovables muestra su enorme variabilidad espacio-temporal, frente a la distribución puntual de los combustibles fósiles. Esta característica, sin embargo, hace que en prácticamente cualquier





lugar podemos contar con al menos una fuente de carácter autóctono. Por otro lado, la riqueza de las fuentes renovables implica un nivel de complejidad mucho mayor que los sistemas de abastecimiento por fuentes convencionales, caracterizado fundamentalmente por la especialización geográfica entre oferta y demanda, con un modelo de generación concentrado y grandes centros de consumo distantes de los recursos y de la generación.

La heterogeneidad espacial de las fuentes renovables hace que se adecuen especialmente, en términos de producción de electricidad, tanto a la resolución de problemas de electrificación rural como a la generación distribuida de electricidad. Por ello, la utilización de los SIG es muy adecuada para el estudio de la gran variabilidad y complejidad del sistema oferta-demanda de energía basado en fuentes renovables, lo cual, viene avalado por la enorme literatura con la que podemos contar al respecto (Dominguez, *et al.*, 2007).

Por otro lado, la percepción de la población respecto a la protección de los recursos naturales no renovables exige a los Estados a buscar formas de satisfacer las necesidades de la población sin afectar a la naturaleza y así fortalecer el crecimiento de las condiciones de nivel de vida en calidad y servicio. Sumado a aquello, el avance tecnológico que procura el ser humano tiende a buscar nuevos horizontes de investigación y generar tecnologías que permitan aprovechar los recursos existentes. En este sentido, los países desarrollados cuentan con programas de investigación, desarrollo y demostración de generación energética alternativa. En estos países se han propuesto diversas metodologías y técnicas que permiten establecer procesos de validación y proponen modelos para identificar zonas con potencial para la generación de energías alternativas.

## **1.2 Justificativos**

En el Ecuador se conocen sistemas de aprovechamiento solar dispersos, especialmente en el Oriente Ecuatoriano, sin embargo de acuerdo a la bibliografía



existente, no responden a ningún sistema de electrificación alternativo o proyecto que se enmarque en alguna metodología específica. Con información proporcionada por National Renewable Energy Laboratory (NREL) de los Estados Unidos, el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) elaboró el Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica. Esta herramienta puede servir para la formulación de proyectos de interés en el campo de las energías renovables, pero no ha sido explotado en su totalidad.

En otra instancia, el Gobierno Ecuatoriano en el Plan Nacional de Desarrollo (Plan Nacional para el Buen Vivir 2009-2013) establece objetivos claros que permitan alcanzar el buen vivir, estableciendo entre otros los siguientes:

- Objetivo 3: Mejorar la calidad de vida de la población;
- Objetivo 4: Garantizar los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable.
  - Política 4.3: Diversificar la matriz energética nacional, promoviendo la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles.
  - Meta 4.3.3: Alcanzar el 6% de participación de energías alternativas en el total de la capacidad instalada al 2013.

La nueva Constitución considera a “la energía en todas sus formas” como un sector estratégico (Constitución República del Ecuador 2008, Art. 313), incluido el transporte y refinación de hidrocarburos. La energía eléctrica es vista como un servicio público cuya provisión se asegurará según principios de obligatoriedad, generalidad, uniformidad, eficiencia, responsabilidad, universalidad, accesibilidad, regularidad, continuidad y calidad (CRE08, Art. 314). Para la gestión de los sectores estratégicos, la prestación de servicios públicos o el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y bienes públicos, se ha previsto constituir empresas públicas que funcionarán bajo derecho público y autonomía (financiera,



económica y administrativa) y sus excedentes podrán destinarse a la inversión o reinversión en la misma empresa, pero en el caso de los excedentes no reinvertidos se transferirán al Presupuesto General del Estado (Art. 315).

Ya que el Ecuador se encuentra ante una fase de desarrollo creciente y como responsabilidad de protección y cuidado del medio ambiente, este estudio con su proyecto de investigación en Área de Medio Ambiente, permitirá aportar en la generación de propuestas y soluciones a los problemas que se presentan en materia de Gestión del Medio Ambiente especialmente en el aprovechamiento energético con propuestas que permitan alcanzar el buen vivir ó Sumak Kawsay.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General:**

**Evaluar Métodos Heurísticos y Matemáticos para la determinación del potencial de generación distribuida con energía fotovoltaica.**

#### **1.3.2 Objetivos Específicos:**

1. Recopilar información existente y disponible en materia de energía solar en el Ecuador.
2. Identificar un modelo heurístico y método matemático que permitan establecer la potencialidad de generación distribuida con energía fotovoltaica.
3. Identificar la técnica de interpolación geoestadística que mejor estime los datos de radiación solar en la zona de estudio.
4. Validar la información existente para su utilización en proyectos relacionados al tema.

### **1.4 Limitaciones**

El presente estudio se centra en la determinación de un modelo heurístico y modelos matemáticos conocidos para la determinación del potencial de generación distribuida con energía fotovoltaica en la Ciudad de Cuenca, mediante el análisis de información existente y disponible, por esta razón el análisis tiene el



limitante dependiente de la calidad de la información, cuyas fuentes son: Instituto Geográfico Militar, CONELEC, repositorios de información satelital de la zona disponibles en la web, anuarios meteorológicos del INAMHI.

Además, al no contar con estudios anteriores sobre la temática a nivel nacional y siendo este un estudio preliminar, es necesario comparar los resultados con aquellos obtenidos en otros proyectos similares; comparación que permitirá contar con un punto de partida que podrá ser validado o ampliado en futuras investigaciones.

### **1.5 Hipótesis**

En el desarrollo del estudio se determinará si las preguntas centrales o hipótesis que se plantean podrán ser cubiertas por los medios técnicos seleccionados, ya que dependiendo de su resolución se determinará la consecución de los objetivos propuestos. Las hipótesis planteadas son:

- Existe potencial territorial en el país para la generación distribuida con energía fotovoltaica?.
- Los métodos heurísticos y modelos matemáticos permiten identificar territorio potencial para la implantación de centrales fotovoltaicas?.
- Es confiable la información solar existente en el Ecuador?

El presente estudio se compone de V capítulos los que se enumeran a continuación:

Capítulo I: Introducción

Capítulo II: Marco teórico

- Conceptos
- Materiales y métodos

Capítulo III: Resultados y Análisis

Capítulo IV: Conclusiones

Capítulo V: Bibliografía



## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1 ASPECTOS GEOGRAFICOS - GEOMATICA**

Los avances tecnológicos y la formulación de nuevas metodologías han permitido al ser humano presentar nuevas técnicas para hacer frente a problemas que se originan, a la par del avance, por el crecimiento acelerado del desarrollo mundial. El conocimiento y aplicación de estas técnicas conlleva el involucramiento de varias ciencias debido a la amplia gama de especializaciones que aprovechan de los avances originados para brindar nuevas formas de satisfacer las necesidades básicas de la sociedad y formas de mitigar los impactos generados.

Una de las ramas que ha mostrado considerable avance es el de la Geomática, naciente con la agrupación de disciplinas con medios informáticos avanzados de gestión espacial, de modelización - simulación y métodos de análisis complejos espaciales (Geoestadística) sumado a métodos clásicos y antiguos como la Topografía y Cartografía, modernos como la Fotointerpretación (fotografías aéreas), contemporáneos como Teledetección (satélites artificiales), Sistemas de Información Geográfico. La Geomática apoyada de las Ciencias de la Tierra y la Informática aprovecha los conocimientos avanzados sobre la forma de la tierra y la interacción existente con los seres vivos que habitan en ella para propiciar espacios técnicos que favorecen estudios más profundos y modelos cercanos a la realidad.

Sobre los Sistemas de Información Geográfico, Burrough (1988) los define como un conjunto de herramientas potentes para recoger, almacenar, recuperar, transformar y mostrar los datos espaciales del mundo real para unos propósitos particulares. Una definición semejante es la de Aranoff (1989) que los considera como un sistema informático que permite cuatro grupos de operaciones para



manejar datos geo-referenciados: entrada, almacenamiento y recuperación, manipulación y análisis, y salida. Los SIG forman parte de los sistemas de información computarizados, conformados por conjuntos de programas que representan y gestionan grandes volúmenes de información. Los datos son espacializados de acuerdo a un sistema de coordenadas geográficas o planas, es una herramienta dinámica usada para analizar y modelar datos y eventos que ocurren en nuestro planeta y producir mapas sobre ellos. Los SIG permiten realizar operaciones de consulta y análisis sobre bases de datos, a la vez que presentan la posibilidad de visualización y realización de análisis geográficos sobre éstas. (Aranoff (1989)

Por su parte, las Imágenes satelitales son las que se obtiene de la captación energética reflejada o emitida por los objetos que se encuentran en la superficie terrestre, (Landsat por ejemplo) conformadas por un conjunto de pixeles que definen la unidad mínima de identificación digital. Cada pixel de la imagen tiene un valor numérico que determina la respuesta de los objetos situados en la superficie a una fuente de energía que varía de acuerdo a las características bio-físico-químicas de los cuerpos. Estas imágenes son capturadas por sensores que captan la energía reflejada o emitida por los objetos y pueden ser caracterizadas por tres parámetros: espacial, espectral y radiométrica. La interpretación de imágenes de satélite permite obtener de forma rápida estimaciones de área cultivada y mapas temáticos actualizados y precisos de las diferentes estructuras espaciales resultantes del proceso de ocupación y uso del suelo. (Portillo Javier et al. 2005).

Los satélites pueden ser de dos tipos:

- Satélites geoestacionarios: orbitan muy alto, y están sincronizados con el movimiento de la tierra.
- Satélites heliosincrónicos: que giran alrededor de la tierra, orbitando a mayor velocidad, generalmente en órbitas polares.



Los sensores poseen resoluciones que favorecen la calidad de información:

- Resolución espacial: capacidad para distinguir objetos de cierto tamaño.
- Espectral: número de bandas espectrales que pueden discriminar el sensor y el ancho que éstas poseen.
- Radiométrica: sensibilidad que tiene el sensor de detectar variaciones de radiancia que recibe.
- Temporal: frecuencia de cobertura de una misma porción de la superficie terrestre.

El sensor capta, a intervalos regulares, la radiación que proviene de la superficie, se denomina "pixel" o picture element: unidad mínima de captación de energía. El valor de la energía captada transforma en un valor numérico: Nivel de gris, valor de gris, nivel de brillo, nivel digital (ND), que puede traducirse en una intensidad visual mediante la referencia a una escala de grises. Entonces se puede definir a la imagen digital como: una colección de números organizados en forma matricial, lo que permite realizar operaciones matriciales matemáticas y estadísticas de acuerdo a las necesidades.

El satélite Landsat fue diseñado con la finalidad de obtener datos de recursos naturales; la serie de satélites Landsat 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 desde el año 1972 dan una de las mejores series históricas de la evolución del planeta. sirvieron para monitorear recursos terrestres, de mayor empleo en aplicaciones agrícolas, forestales, usos de suelo, hidrología, recursos costeros y monitorización medio ambiental y está ligado a estudios territoriales en los que el parámetro fundamental es el medio ambiente. (Ignacio Fernández, Eliecer Herrero; Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ Satellite Landsat. 2001).

Se han creado varias herramientas para el manejo de la información captada por los satélites o las fotografías aéreas, entre ellos se cita:



- a) Sistema Espacial de Apoyo de Decisiones: (SDSS en inglés) se ocupa de los procesos de decisión donde el aspecto espacial de un problema juega un papel decisivo. (R. Jansen, 2003).
- b) Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA): fue usado por Belton y Stewart [2002] como un término general para describir un conjunto de métodos formales que tratan de tener en cuenta criterios múltiples para ayudar a individuos o grupos a explorar decisiones. (Stewart, 2002).
- c) Modelo matemático: es aquel que emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad. Un modelo permite describir la estructura matemática de una situación real. (Análisis y Simulación de Procesos. David Mautner Himmelblau, Kennethb. Bischoff.)

### 2.1.1 Forma de la tierra

Diversas teorías se han generado a lo largo de la historia sobre la forma de la tierra, Pitágoras (580-500 AC) el primer planteamiento de una tierra esférica, en el siglo XVII se propuso el achatamiento en los Polos sustituyéndose la esfera por el elipsoide de revolución. Avances sobre la dinámica terrestre describen una superficie irregular variante con el tiempo, no definida matemáticamente, generada por las interacciones que suceden como: actividad tectónica, sísmica, erupciones volcánicas, mareas terrestres y oceánicas, deshielos en los polos. El concepto, manejado en la actualidad, de geoide fue introducido en 1872, por Listing, que identifica a la tierra como una superficie equipotencial del potencial gravitatorio, suma del potencial de la gravedad y la fuerza centrífuga que actúa sobre ella. (D<sup>a</sup>. M<sup>a</sup>. Amparo Nuñez A.2006).





El Datum es el modelo matemático creado para que el geoide sea ajustado en parte o su totalidad. Está definido por un elipsoide y se relaciona con un punto de la superficie topográfica para establecer su origen. La relación existente se define mediante seis parámetros: latitud, longitud geodésica y la altura del origen, los dos componentes de la deflexión de la vertical en el origen y el azimut geodésico de una línea de dicho origen a cualquier punto. Se definen dos tipos de datum: (CPIAA Chubut, 2002).

- a. Datum geodésico horizontal: es el punto de referencia para el levantamiento de puntos de control que son representados por la latitud, longitud y azimut de una línea a partir de ese punto y los parámetros del elipsoide de referencia.
- b. Datum geodésico vertical: es el punto de referencia que se toma en cualquier superficie nivelada a partir del cual se calculan las elevaciones. Generalmente el geoide que se elige es aquel cuya superficie equipotencial del campo gravitacional terrestre se acerque al nivel medio del mar; estas alturas se denominan alturas ortométricas (H) y son las que se encuentran representadas en las cartas topográficas.

La finalidad de los estudios que se realizan a nivel de superficie terrestre involucrando varias disciplinas es la representación de los resultados en un Mapa que se define como: la representación convencional gráfica de fenómenos concretos y abstractos, localizados en la tierra o en cualquier parte del universo. (Vázquez M. 1973).

#### Modelo digital de elevaciones (MDE):

Se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. De forma general, la unidad básica de información en un MDE es un valor de altitud, "Z", al que acompañan los



valores correspondientes de  $x$  e  $y$ , expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa referenciación espacial (Felicísimo, 1994).

#### Modelo digital del terreno (MDT):

Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1994). Con los MDT se puede representar varias propiedades del terreno, permiten una elevada precisión en la descripción de los procesos pero no garantiza la exactitud de los resultados. El término MDT se utiliza como denominación genérica para representar la tridimensionalidad de la variable obtenida mediante técnicas de interpolación entre  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

## **2.2 SOFTWARE**

Este estudio requiere del apoyo de programas que permiten el análisis de la información, el uso de varias variables, la comparación entre distintos modelos, la georeferenciación y la elaboración de mapas en la representación final de los resultados.

El software permitirá combinar variada información para su tratamiento, análisis y posterior interpretación, como las utilizados en los Sistemas de Información Geográfico: Grass - Sig, Arcmap, Idrisi y aquellos de programación como: Python, Java.

## **2.3 ENERGÍA RENOVABLE**

Se llama fuente de energía renovable a aquella que puede explotarse ilimitadamente ya que su cantidad en la tierra no disminuye a medida que se aprovecha. La principal fuente energética es el Sol ya que éste envía energía radiante como: luz visible, radiación infrarroja y algo de ultravioleta.

Entre las ventajas de esta clasificación se tiene que son respetuosas con el medio ambiente, no emiten gases contaminantes, no generan residuos peligrosos, se



pueden instalar en zonas rurales y aisladas y disminuyen la dependencia de suministros externos. Como punto clave se aclara que el impacto medioambiental en la generación de electricidad de las energías convencionales es 31 veces superior al de las energías renovables. (J. Méndez, R. Cuervo.2009).

Un criterio común para la definición de las energías renovables (ER) es contrastarlas frente a las Energías No Renovables (ENR), que son combustibles fósiles que no se producen o reponen por ningún medio, por lo que su consumo agota el stock natural y provoca afectaciones ambientales, entre otras, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La evolución energética se divide en dos momentos: “Hasta la revolución industrial, las técnicas energéticas se enfocaban generalmente en la conversión de biomasa en carbohidratos para dar energía al trabajo humano y animal....Los combustibles hidrocarburos que impulsaron la revolución industrial son el resultado de la captura de energía en la forma de material vegetal fosilizado del periodo carbonífero de la era paleozoica” (Byrne et. al., 2007; viii).

Asimismo, los aprovechamientos en base a fuentes renovables de energía, como cualquier otra actividad humana, generan impactos ambientales, los que pueden ser verificados, mitigados y remediados con estudios y planes de manejo ambiental para las energías sostenibles (Boyle, et. al; op cit). La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), entre sus principios para políticas efectivas, establece los tres principales propósitos o desafíos que deben enfrentar las ER:

- Detener al Cambio Climático.
- Detener la degradación del ambiente.
- Seguridad energética

En el Ecuador, país rico en diversidad y fuentes, el aprovechamiento de energía renovable ha tenido un impulso en los últimos años, especialmente en la



transformación de energía generado por los cursos hídricos en energía eléctrica. De acuerdo a los datos del Ministerio de Electricidad y Energías Renovables las fuentes renovables en el país aportan con apenas el 8% de la producción primaria de energía en barriles equivalentes de petróleo (BEP) a 2007, la que en su conjunto se compuso de acuerdo a lo expresado en el Gráfico N°1.

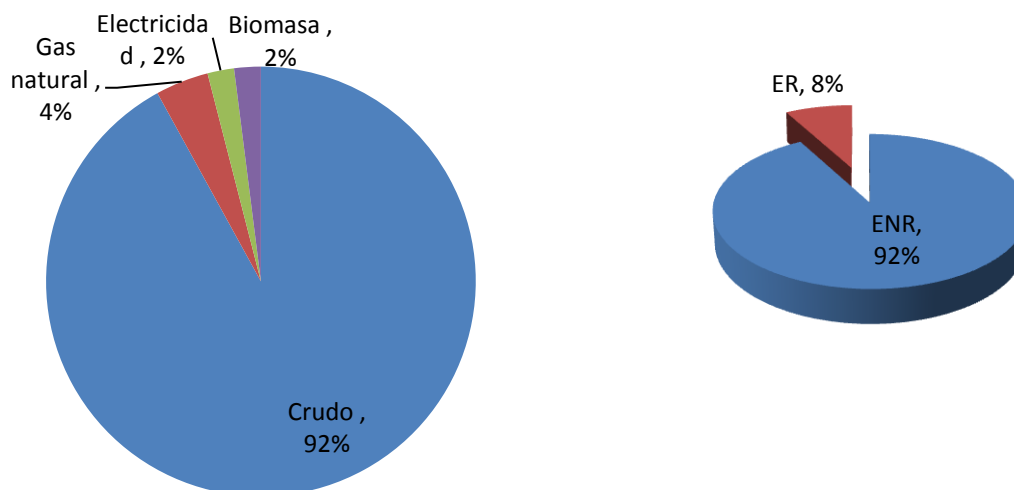


Gráfico N° 1: Aporte energético en el Ecuador

### 2.3.1 ENERGIA SOLAR

Está constituida simplemente por la porción de la luz que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra, puede aprovecharse directamente en (José Fernandez S.2008):

- Energía solar directa: la utilización directa de la luz que emite el sol, como para secado de ropa, iluminación, procesos de producción con tecnología simple.
- Energía solar térmica: es aquella cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento del algún medio., como la climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado,



- Energía solar fotovoltaica: aquella aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas con capacidad de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin que tenga lugar un efecto térmico.

### 2.3.2 Conceptos fundamentales sobre energía solar

La principal fuente de energía para el planeta Tierra es el Sol, una inmensa esfera de gases de alta temperatura con un diámetro de  $1.39 \times 10^9$  m, situado a la distancia media de  $1.5 \times 10^{11}$  m respecto del planeta, esta distancia se denomina unidad astronómica. (José Fernández S.2008).

El sol está formado por un núcleo y capas superpuestas llamadas, de adentro hacia afuera, fotosfera, capa de inversión, cromosfera y corona, su temperatura no es uniforme estimándose un orden de 8 a 40 millones de grados Kelvin en el interior y en el exterior de unos  $6000^\circ\text{K}$ . (Lluís Jutglar.2004). La energía generada en el interior se transmite a la fotosfera mediante mecanismos de convección, llega a la zona llamada de inversión y finalmente a la cromosfera y a la corona.

Se puede identificar tres tipos de movimientos de la Tierra respecto del Sol: traslación, rotación y nutación.

- Traslación: traslación alrededor del sol siguiendo el plano de la elíptica.
- Rotación: giro sobre un eje imaginario que pasa por los polos y que forma un ángulo medio de  $23^\circ 27'$  con la normal al plano de la elíptica. Es por esto que la incidencia de los rayos solares sobre la superficie de la Tierra varía a lo largo del año especialmente en las épocas que se producen los solsticios (invierno y verano) y equinoccios (primavera y otoño).
- Nutación: a lo largo del año la posición del eje de giro oscila ligeramente alrededor de su posición media.

Debido a estos movimientos de la Tierra, el flujo de la energía solar es distinta en la superficie, es por ello que se combinan tres factores para determinarlo: distancia



Tierra - Sol, diámetro solar y temperatura del Sol. Este flujo de energía es determinado en unidades de energía por unidad de área y unidad de tiempo, así  $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$  equivalentes a  $\text{W/m}^2$ . En base al comportamiento histórico de la radiación emitida por el sol y a sus condiciones geométricas, se ha llegado a determinar que sobre la atmósfera de la tierra incide una cantidad constante de radiación solar, dando paso a la definición de constante solar. Se define, entonces, a la constante solar como el flujo de energía proveniente del sol que incide sobre una (hipotética) superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera. (José Fernández S.2008).

El valor aceptado para la constante solar ( $G_{sc}$ ) es el indicado en la Ecuación N° 1 en  $\text{W/m}^2$ :

$$G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2 \text{ (Ecuación N°1)}$$

Expresado en otras unidades, Ecuación N°2:

$$G_{sc} = 1.940 \text{ cal/cm}^2\text{min} = 4.872 \text{ kJ/m}^2\text{hr. (Ecuación N°2)}$$

Estos valores han sido aceptados por la NASA (1971) y por la ASTM. (José Fernández S.2008).

A la tierra solo llega 1/3 de la energía total interceptada por la atmósfera, y de ella el 70% cae en el mar, como se ilustra en la Imagen N° 1.

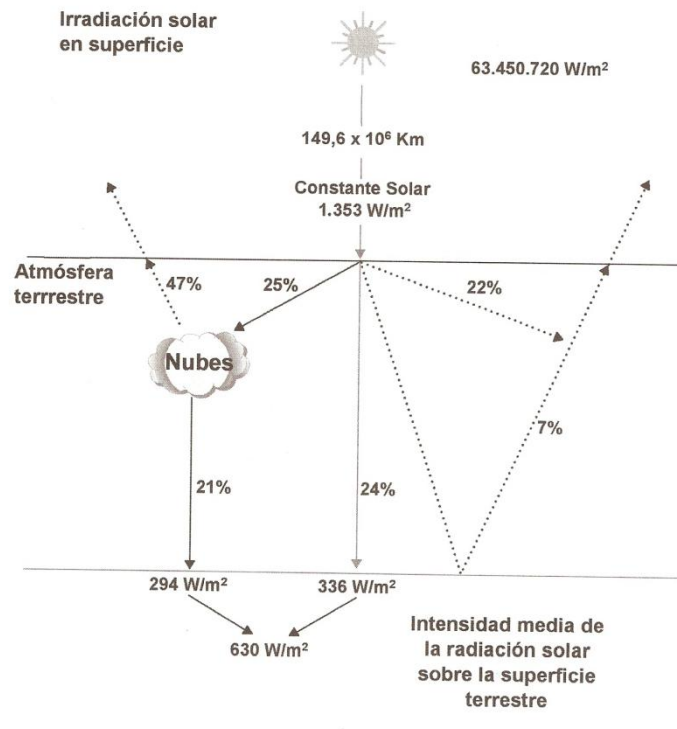


Imagen 1: Distribución radiación solar.  
Fuente: J,Méndez. R, Cuervo

### 2.3.3 Tipos de radiación solar

La radiación solar es el conjunto de las radiaciones electromagnéticas que emite el Sol y que determinan la temperatura en la Tierra. La radiación ionizante, por su parte, propaga la energía suficiente para ionizar la materia. Esto quiere decir que la radiación ionizante produce iones y extrae los electrones del estado ligado al átomo.

En función de la incidencia de los rayos solares sobre la Tierra se distinguen tres componentes de la radiación solar (J. Méndez, R. Cuervo.2009):

- Directa: recibida desde el Sol sin que se desvíe en su paso por la atmósfera.



- Difusa: es la que sufre cambios en su dirección principalmente debidos a la reflexión y difusión en la atmósfera.
- Albedo: es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

Las tres componentes actúan como radiación total sobre la tierra, siendo la directa la más incidente, sin embargo cuando en una zona de la tierra no haya incidencia directa la radiación difusa ejerce sobre el área en sombra.

En el campo electromagnético, la radiación solar, se extiende desde los rayos gamma (de longitud de onda  $10^{-10}$  cm e inferiores) hasta las ondas de radio (longitudes de onda  $10^{+5}$  cm y superiores). La mayoría de la radiación solar cae entre las longitudes de onda de 0.15 a 120  $\mu$ m (micrómetros), y la radiación de importancia práctica a los usuarios de la energía solar cae entre 0.15 y 3.0  $\mu$ m. las longitudes de onda de la radiación visible están entre 0.38 y 0.72  $\mu$ m. La cantidad de energía radiada por el sol se estima a una razón de  $3.8 \times 10^{23}$  kW, como se ilustra en la Imagen N° 2.

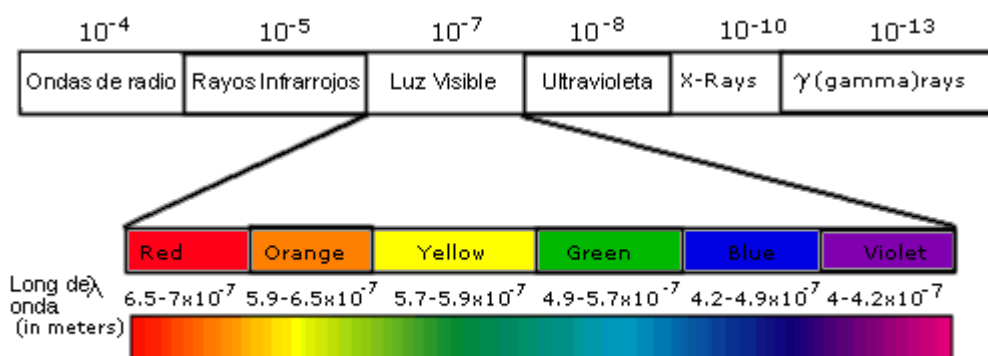


Imagen 2: Espectro Electromagnético.

Fuente: Glosario online.

### 2.3.3.1 Radiación normal extraterrestre

La irradiancia, en electromagnetismo, se define como el valor de la intensidad energética promedio de una onda electromagnética en un punto dado y se calcula



como el valor promedio del vector de Poynting:  $I = \langle S \rangle_T$ , se utiliza para definir la constante solar.

En otra definición, es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. Se establece como la energía radiante por unidad de tiempo que incide sobre una superficie en un momento dado. (Lluís Jutglar.2004), su comportamiento se indica en la Imagen N°3.

La relación que describe el flujo de energía sobre un plano normal a la radiación a lo largo del año es la indicada en la Ecuación N°3:

$$G_{on} = G_{sc}(1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365}) \quad (\text{Ecuación N° 3})$$

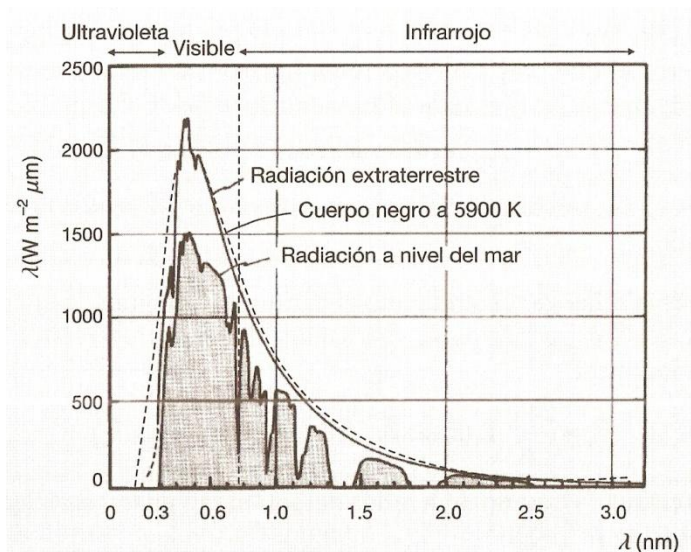


Imagen 3: Espectro de la radiación solar extraterrestre y a nivel del mar

Fuente: Energía Solar, L.Jutglar.



### 2.3.3.2 Radiación solar terrestre

La radiación solar debe atravesar toda la estructura de la atmósfera terrestre antes de llegar a la superficie, en su trayecto experimenta fenómenos de reflexión, absorción y difusión lo que provoca una disminución en su intensidad distribuyéndose en radiación directa (llega directamente) y radiación difusa (absorbida y difundida).

La composición molecular de la capa de aire que atraviesa actúa como una banda de absorción que afecta la intensidad de la radiación. Las capas de agua y anhídrido carbónico son las que causan un mayor efecto cuantitativo; el ozono actúa en la zona del ultravioleta y cuantitativamente no tiene gran importancia pero si cualitativamente, ya que el ozono estratosférico crea una barrera altamente cancerígena. (José Fernández S.2008).

Otros tipos de energía radiante, además de la directa y difusa, que inciden sobre una superficie cualquiera en la tierra se pueden identificar como (Lluis Jutglar.2004):

- Albedo: radiación que llega a la superficie considerada, después de haberse reflejado en las superficies del entorno.
- Radiación global: es la suma de la directa y la difusa.
- Radiación total: es la suma de la directa, la difusa y el albedo.

En la Tabla N°1 se indican valores del efecto albedo, de la relación entre la energía reflejada y la incidente:

**Tabla N°1: Valores efecto albedo**

Tipo de superficie	Factor Albedo (%)
Suelo cultivable desnudo	Entre 10 y 15
Hierba	Entre 19 y 26
Bosque verde	12
Pavimento de cemento	28
Pavimento de granito	19
Pavimento de piedra	10
Asfalto	14
Arena clara	Entre 25 y 40
Agua encalmada	5 en invierno y 18 en verano

Fuente: Energías alternativas y medio ambiente.  
Elaboración: Autor

Las proporciones de radiación dependen de factores como: las condiciones meteorológicas, inclinación de la superficie respecto al plano de la horizontal, de la presencia de superficies reflectantes. En general los datos de radiación solar de que se dispone son en el mejor de los casos valores de irradiación global horaria sobre la superficie horizontal.

### 2.3.3.3 Medición de la energía solar incidente sobre el suelo

Existen instrumentos y métodos para determinar la cantidad de energía que llega a una superficie, entre ellos:

- Pirarómetro o solarímetro: medidor de radiación total basado en la exposición a la radiación solar de una lámina metálica con una superficie reflectante y junto a ella otra de superficie absorbente. Consta de un sensor colocado bajo cubierta hemisférica. (Creus, A.1993)



- Pirheliómetro o actinómetro: mide solamente la radiación solar directa; en esencia es un piranómetro que se ha situado en el fondo de un tubo que está recubierto interiormente con una pintura absorbente, proporciona medidas correctas cuando está enfocado directamente al Sol.
- Heliógrafo: utilizado para medir la insolación, que es el número de horas de sol brillante que se producen a lo largo del día. El más utilizado es el de Campbell-Stokes o de bola puesto que consiste en una bola de cristal transparente interpuesta entre el Sol y una banda semicircular de papel sensible a la luz.
- Heliofanógrafo: aparato que registra de manera gráfica la duración del brillo solar. Constituida por un lente esférico que realiza quemaduras en una faja de papel debido a la radiación recibida en forma directa e instalado a un metro cincuenta de altura.

## 2.4 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Energía aquella producida mediante el efecto del calor del sol en una placa solar. Se usa principalmente en hogares para calentar agua y para calefacción, y en instalaciones de alumbrado en carreteras mediante una batería que se carga durante el día. Proviene del sol y se produce por la fusión de los núcleos atómicos de hidrógeno, componente principal del Sol. (Energía solar fotovoltaica, Colegio Ingenieros de telecomunicación. Madrid 2002).

Es una tecnología que genera corriente continua (potencia medida en watios o kilowatios) por medio de semiconductores cuando éstos son iluminados por un haz de fotones. Mientras la luz incide sobre una célula solar, que es el nombre dado al elemento fotovoltaico individual, se genera potencia eléctrica; cuando la luz se extingue la electricidad desaparece. Las células solares no necesitan ser cargadas como las baterías.

Existen dos conjuntos de procedimientos para lograr la conversión de energía solar en eléctrica: sistemas de conversión termodinámica y sistemas directos que



no requieren partes móviles y están basados en las interacciones físicas entre los fotones de la radiación incidente y los electrones de los materiales sobre los que inciden.

Un sistema fotovoltaico es una disposición basada en módulos fotovoltaicos cuyo propósito fundamental es producir energía eléctrica, éstos módulos convierten la luz del sol en energía eléctrica. Este tipo de energía está direccionada para muchas aplicaciones como sistemas fotovoltaicos autónomos (aquellos que no disponen de conexión energética) y generación de energía eléctrica o sistemas conectados a red. (Abella 2005.)

Una de las principales características de los generadores FotoVoltaicos (FV), que los diferencia de otras fuentes de energía renovable, es que solo generan electricidad cuando reciben la luz del Sol (irradiancia solar) y, obviamente, el total de energía que producen es directamente proporcional a la irradiancia solar que reciben en su superficie.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos se diseñan y dimensionan en función de la aplicación energética a la que van destinados, presentando problemáticas diferentes para cada aplicación, siendo especialmente complejos aquellos que van destinados a la satisfacción de necesidades energéticas domésticas y de usuarios individuales.

El generador FV es el que transforma la energía del Sol en energía eléctrica. Está constituido por varios módulos fotovoltaicos conectados en serie y/o paralelo, y a su vez, cada módulo fotovoltaico está formado por células fotovoltaicas. La potencia que puede suministrar una única célula FV es normalmente del orden de 3 W. Este valor, insuficiente para la mayoría de las aplicaciones, hace que el fabricante las integre en módulos FV. La potencia que suministra un módulo FV estará en consonancia con el número de células que agrupe. (Abella 2005.)



### **2.4.1 Sistemas descentralizados**

La instalación de un gran número de sistemas descentralizados y distribuidos en los mismos puntos de consumo, por las características de la tecnología fotovoltaica, representa una gran ventaja frente a la misma potencia en pocas instalaciones grandes, pues se eliminarían las pérdidas de energía en el transporte. Los sistemas fotovoltaicos conectados a red están orientados a la maximización de la energía anual producida e inyectada a la misma y se pueden clasificar en función de su potencia y su grado de integración en viviendas y edificios, siendo sus componentes esenciales el generador fotovoltaico y un inversor de conexión a red. (Abella 2005.)

Abella (2005) plantea las siguientes características de éstos sistemas para su viabilidad, entre otros:

- a. Existencia de una línea de distribución eléctrica próxima, con capacidad para admitir la energía generada por la instalación fotovoltaica.
- b. Proyectar un sistema que incluya equipos de generación y transformación de primera calidad, con las protecciones establecidas y debidamente verificados y garantizados por los fabricantes [...].
- c. La determinación del punto de conexión con la compañía distribuidora.

En las instalaciones conectadas a red, el tamaño de la instalación no está sujeta al consumo de electricidad de la vivienda o edificio lo que facilita su diseño. Pero es necesario conocer el espacio disponible, la inversión inicial y la rentabilidad que se quiere lograr puesto que el consumo de electricidad es totalmente independiente de la energía producida por los paneles fotovoltaicos.

La finalidad de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica es maximizar anualmente la producción de energía eléctrica que se inyecta a ésta. Las principales aplicaciones son: para tejados en viviendas (integración en



edificios), y para plantas de generación de energía (centrales fotovoltaicas). (Alcor 2002).

La potencia típica de la gran mayoría de las instalaciones se encuentra en torno a los 5 kWp en viviendas unifamiliares y hasta 100 kWp en otras instalaciones en edificios de integración urbana. La potencia nominal de las instalaciones en viviendas unifamiliares o edificios en general se relaciona con la superficie útil disponible para la instalación del generador fotovoltaico, aproximadamente de 8 a 10m<sup>2</sup> por kWp, en función del rendimiento del generador FV. Las centrales fotovoltaicas de generación eléctrica de conexión a red poseen potencias nominales superiores a los 100 Kw. (Franco Aceituno. 2012)

Las centrales FV, además de la generación de energía eléctrica, también pueden alisar los picos de demanda de consumo eléctrico que habitualmente transcurren simultáneamente con los picos de generación FV, al mediodía. En otras ocasiones se pueden utilizar para mejorar la calidad de la red, en redes locales muy distantes a los puntos de generación o, incluso, para el control voluntario de generación de energía reactiva. (Franco Aceituno. 2012)

#### **2.4.2 Centrales de potencia**

La energía solar fotovoltaica puede ser una fuente de generación de electricidad, encontramos grandes centrales fotovoltaicas en España, Alemania, Italia, EE.UU., Suiza, Holanda, Grecia, etc. En estas centrales se hallan fácilmente potencias de varios MWp en espacios denominados *Huerta Solar* con varias instalaciones de potencia nominal como mínimo de 5kWp.

Durante mucho tiempo la utilización de la energía solar fotovoltaica ha sido orientada al suministro energético de algunos edificios o viviendas en lugares remotos donde no lograba llegar la red eléctrica, pero a medida que los costes se



van reduciendo los sistemas FV distribuidos en edificios conectados a la red eléctrica se expanden y pueden alcanzar un elevado grado de comercialización. (Alcor, 2002).

Según, Abella (2005) las principales ventajas derivadas de la conexión a la red eléctrica de los sistemas de energía solar fotovoltaica son:

- a. Fuente gratuita y renovable de energía: El gasto originado por la energía solar fotovoltaica es únicamente el coste inicial de la instalación.
- b. Bajo mantenimiento: Los módulos FV, con 30 años de instalación, aún continúan en perfecto estado de operación, sin degradaciones significativas. El período de garantía que ofrecen los fabricantes de estos módulos se sitúan en el rango de los 20 a 25 años.
- c. No contamina. Las emisiones contaminantes son inapreciables y sólo se originan en los procesos de producción de las células y módulos fotovoltaicos.
- d. Soporte en horas pico.
- e. Reducción de costos.

En España, por ejemplo, los tejados fotovoltaicos pudieron haber proporcionado el 24.2% de la electricidad consumida en el año 1990. Como se mencionó éstas instalaciones no poseen baterías ni reguladores, componiéndose únicamente de los módulos fotovoltaicos y del inversor. Los módulos fotovoltaicos son los mismos que para las instalaciones aisladas de red, sin embargo, los inversores deben tener las siguientes características (Plan solar de Castilla y León):

- a. Disponer de un sistema de medida de la energía consumida y entregada.
- b. Ser capaz de interrumpir o reanudar el suministro en función del estado del campo de paneles.
- c. Adaptar la corriente alterna producida por el inversor a la fase de la energía de la red.





La fuente luminosa usada para medir la potencia de salida de un panel FV tiene un espectro luminoso correspondiente a una intensidad muy cercana a  $1\text{ kW/m}^2$ , en la fabricación de paneles fotovoltaicos se determina la máxima potencia eléctrica de salida usando una fuente con una potencia luminosa igual a la del espectro. Esta unidad es conocida como SOL, traduciendo a unidades conocidas se tiene:

$$1 \text{ SOL} = 1\text{ kW/m}^2 = 100\text{ milliwatts/cm}^2.$$

El valor de la irradiación varía con la masa de aire ya que ésta cambia constantemente desde el amanecer hasta la puesta del sol. En la simplificación del cálculo de la energía eléctrica generada diariamente por un panel FV, se acostumbra a definir el día solar promedio; siendo el número de horas durante el cual el sol irradia con una potencia luminosa de 1 SOL. Además la duración del día solar promedio representa la cantidad de horas, del total de horas de luz diaria, en que el panel es capaz de generar la potencia máxima de salida especificada por el fabricante. (Franco Acietuno, 2012)

## 2.5 Análisis Imágenes Satelitales

Las imágenes captadas por los sensores (aéreos y satelitales) poseen una serie de interferencias que hacen que la información captada resultante posea errores alterando su composición e información real, las correcciones que se realizan corresponden a radiométricas y geométricas de la imagen, así como el ruido (Medina Mena.2001). Las interferencias que hacen que la información obtenida aparezca perturbada por una serie de errores pueden ser:

- a. Fallos en los sensores, generan pixeles incorrectos (corrección radiométrica).
- b. Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación, generan distorsiones en la imagen global (corrección geométrica).
- c. Interferencias de la atmósfera, alteran de forma sistemática los valores de los pixeles (corrección atmosférica).



## 2.5.1 Corrección de imágenes

### 2.5.1.1 Geo-referenciación y Corrección geométrica

Corresponden a errores sistemáticos y no sistemáticos, los primeros pueden ser corregidos utilizando la información de la plataforma y las características (distorsión interna) de los sensores, mientras que los sistemáticos requieren del soporte de otra fuente de información como imágenes o puntos de control terrestre.

El proceso puede realizarse utilizando datos raster - raster o vector - raster en el mismo sistema de referencia:

a. Imagen a imagen:

Procedimiento de traslación y rotación por medio de dos imágenes de igual geometría y zona geográfica, el resultado deberá ser correspondiente entre las imágenes al superponerlas una sobre otra.

b. Imagen a mapa:

Se utilizan puntos de control terrestre donde se pretende convertir la geometría de una imagen a planimetría mediante la medición de área, dirección y distancia con gran precisión.

Consiste en dar a cada pixel su localización en un sistema de coordenadas estandar (UTM, Lambert, geográficas, etc.) para así poder combinar la imagen del satélite con otro tipo de capas en un entorno SIG, debido a las distorsiones que sufre la imagen en su proceso de adquisición.

Las deficiencias geométricas deben ser corregidas hasta obtener la precisión geométrica o georeferenciar las imágenes, es decir ubicar los pixeles correctamente con respecto a la información vectorial normalizada, éstas deficiencias son generadas por la rotación de la Tierra y el ángulo de incidencia del sensor.



Las correcciones necesarias para transformar en cada punto de la imagen sus coordenadas arbitrarias (fila - columna) en coordenadas reales (X e Y UTM por ejemplo) se explicitan mediante dos ecuaciones que hacen corresponder a cada pixel definido por sus coordenadas de imagen (fila y columna) un par de coordenadas (X,Y) en el sistema de referencia espacial al que se va a convertir la imagen: (NASA.2003)

Es necesario aplicar un procedimiento para transferir la información de los pixeles originales a los pixeles resultantes del proceso de transformación ya que con estas funciones de transformación va a crearse una nueva matriz correctamente posicionada, pero vacía. El llenado de esta matriz es, precisamente, el objetivo de la última fase de la transformación de coordenadas.

Conociendo que las imágenes se componen de una matriz de pixeles en la que a cada elemento le corresponde un Número Digital (ND) de ubicación de columna (c) y fila (f) el proceso consiste en ubicar pixeles procesados siguiendo cualquiera de los siguientes métodos (Brizuela, A.et al.2007):

- a) Método del vecino más próximo: sitúa en cada pixel de la imagen corregida el valor del pixel más cercano en la imagen original, presenta una solución rápida y la que supone menor transformación de los valores originales. El problema es la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen.
- b) Interpolación bilineal: supone promediar los valores de los cuatro pixeles más cercanos en la capa original, este promedio se pondera según la distancia del pixel original al corregido así tienen mayor influencia aquellos pixeles más cercanos en la capa inicial. Reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales pero difumina los contrastes espaciales.
- c) Convolución cubica: considera los valores de los 16 pixeles más próximos, el efecto visual es más correcto en caso de que se trabaje con imágenes de satélite o fotografías realizadas pero supone un volumen de cálculo mucho mayor y difumina los contrastes.



En el programa de libre acceso GRASS-SIG el proceso de georeferenciación se realiza utilizando el módulo *i.rectify* que genera una ecuación polinómica de transformación (elección del grado) aplicando a cada una de las capas originales para crear una equivalente pero ya georeferenciadas.

En el programa ARCGIS se puede realizar la georreferenciación mediante la herramienta *georeferencing*.

### 2.5.1.2 Corrección radiométrica

Las interferencias atmosférica entre el terreno y el sensor contribuyen con errores de tipo radiométrico en los datos que se recolectan, lo que no permite representar de buena forma el terreno analizado. La corrección que se realiza se denomina Calibración absoluta donde se consideran ciertos parámetros como la transmitividad atmosférica, irradiancia difusa del cielo y la ruta de la radiancia para el análisis de la afección del efecto atmosférico en la radiancia que mide el sensor.

Entre los métodos que se pueden utilizar se describen el método COST y Sustracción del objeto oscuro (DOS, siglas en inglés) que son óptimos para imágenes Landsat 5 (Brizuela, A. et al. 2007). La radiación electromagnética captada por los sensores de los satélites atraviesa la atmósfera y es modificada por efecto de la dispersión debido a la interacción con las moléculas y partículas de la atmósfera. La dispersión Rayleigh es producida por las moléculas de los gases atmosféricos y es una de las principales causas de bruma, lo que genera una disminución del contraste de la imagen. El tamaño de las moléculas es inferior a la longitud de onda de la radiación y afecta más a las longitudes de onda corta (Tagestad, 2000). Cuando se presentan gotitas de agua ocurre una dispersión de todas las longitudes de onda, tanto en el rango visible como en el infrarrojo (Lillesand and Kiefer, 1987).



La señal recibida por los sensores se codifica en los diferentes valores de ND de acuerdo a la reflexión de la radiación electromagnética de las cubiertas. Para pasar de ND a reflectividades se realiza dos pasos: pasar ND a valores de radiancia y segundo estimar los valores de reflectividad aparente conociendo la irradiancia solar y la fecha de adquisición de la imagen.

En las imágenes Landsat 5 los detectores están calibrados en una relación lineal entre los ND y la radiancia espectral, esta última descrita por los siguientes parámetros: el rango de valores ND en la imagen, la radiación más baja ( $L_{min}$ ), y la radiación más alta ( $L_{max}$ ) (Ecuación N° 4). La radiancia  $L$  se expresa en  $W\ m^{-2}\ sr^{-1}$ .

$$L = \left( \frac{L_{max} - L_{min}}{255} \right) ND + L_{min} \text{ (Ecuación N°4)}$$

Puesto que el objetivo es determinar modelos para estimación solar no se considera necesario realizar la corrección radiométrica ya que no se trata de un análisis multitemporal.

## 2.6 Materiales

El compendio de datos corresponde a recopilación de información secundaria de libre acceso, cartografía de tipo vectorial y raster, base de datos de información solar (disponible) con los que se ha formado un paquete de datos que fueron procesados y normalizados en un mismo sistema de proyección y datum:

- a. Proyección y Datum: sistema de Referencia Geodésico Mundial WGS-84.
- b. Información Cartográfica: formato *shapefile* reconocido por programas SIG.

### 2.6.1 Información Secundaria

Para el desarrollo del estudio se recopiló la información de libre acceso en portales web del Ecuador y globales, información que se detalla en los apartados 2.6.1.1 a 2.6.1.5.



### 2.6.1.1 Base datos solar del Ecuador

Se obtuvo la base de datos con la que se elaboró el "Atlas Solar del Ecuador con fines de Energía Eléctrica", elaborado por la Corporación para la Investigación Energética (CIE) bajo solicitud de la entidad de regulación energética del Ecuador el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), siendo hasta la fecha la única información generada disponible en el país.

La entidad que generó la información es la National Renewable Energy Laboratory (NREL) de los Estados Unidos, mediante el método Climatological Solar Radioation Model (CSRM) desarrollado para conocer la insolación diaria total sobre una superficie horizontal en celdas de aproximadamente 40km x 40km, alrededor del mundo. Estos resultados han sido comparados y validados con mediciones obtenidas por estaciones obteniendo un error de 10%. La información que utiliza: traza de gases, vapor de agua atmosférico, nubosidad, cantidad de aerosoles, son complementados con mediciones tomadas usando superficies colectoras móviles que son montadas en instrumentos que siguen el recorrido del sol.

La información, recopilada, corresponde al período entre el 1 de Enero de 1985 y el 31 de Diciembre de 1991 que fuese publicado en Julio del año 2006. Los datos representan la energía solar promedio mensual y anual de los valores diarios de insolación total (directa y difusa) e insolación global sobre una superficie horizontal y contienen los promedios mensuales de cada una de ellas en Wh/m<sup>2</sup>/día. (Atlas Solar del Ecuador. CIE.2008).

Se generó una grilla de datos procesados, con 472 puntos sobre el territorio continental del Ecuador en celdas de 40Km x 40Km que posteriormente fueron analizados estadísticamente para conocer su comportamiento y obtener datos semejantes (isohelias) con una resolución de 1Km<sup>2</sup>. El total de información



generada, en el Atlas Solar, fue de 36 mapas mensuales con resultados de insolaciones directa, difusa y global.

### **2.6.1.2 Cartografía temática**

Instituto Geográfico Militar (IGM):

El IGM es una entidad del Estado Ecuatoriano, que de acuerdo al artículo 1 de la Ley de Cartografía Nacional publicada en el Registro Oficial número 643 de 17 de Julio de 1978, constituye la entidad oficial responsable de la planificación, organización, dirección, coordinación, ejecución, aprobación y control de las actividades encaminadas a la elaboración de la Cartografía Básica de la República del Ecuador y del Archivo de Datos Geográficos y Cartográficos del País.

Esta entidad (IGM) dispone, en su sitio web [www.geoportaligm.gob.ec](http://www.geoportaligm.gob.ec), información cartográfica de libre acceso de el Ecuador:

- a. Base Nacional: Escala 1:1'000.000
- b. Base Regional: Escala 1:250.000; 1:50000

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC):

El Sistema de Información Estadística Georeferenciada - SIEG, es una herramienta del INEC que nació de la necesidad de posicionar a la institución como un ente generador de información estadística georeferenciada de las jurisdicciones político - administrativas para facilitar la medición de indicadores y la proyección del desarrollo social y productivo del estado ecuatoriano.

### **2.6.1.3 Imágenes satelitales**

Se obtuvieron imágenes satelitales de la plataforma LANDSAT de libre acceso y publicadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en su portal de internet (<http://www.usgs.gov/pubprod/>). Otra fuente de información es la existente en Digital Globe, Satellite Imagery and Geospatial Information Products



en su portal de internet (<http://www.digitalglobe.com/?micro=true>), información tipo raster que será manejada en la evaluación del modelo heurístico.

#### 2.6.1.4 Registros meteorológicos

En la provincia del Azuay, el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca tiene a su cargo la gestión de estaciones meteorológicas en las que se han implementado receptores para radiación solar global, ubicadas en los sectores de El Valle y en Sayausí, la Tabla N°2 indica las coordenadas de localización.

Tabla N°2: Estaciones meteorológicas - radiación solar - Cantón Cuenca

ESTACIÓN ESMERALDA			ESTACIÓN MARIANZA		
UTM - Este	UTM - Norte	Cota	UTM - Este	UTM - Norte	Cota
M	m	m s.n.m	m	m	m s.n.m
730471	9651481	2638	708890	9684605	3454

Fuente: PROMAS - Universidad de Cuenca  
Elaboración: Autor

La información recopilada de radiación solar pertenece al período Enero 2005 - Febrero 2013 con registros mensuales intermitentes que servirán para realizar una comparación de resultados. Debido a la escasez de datos y distancia entre las estaciones es necesario complementar esta información con la proveniente de otras fuentes para realizar cálculos y obtener resultados fiables.

Por otra parte el Instituto Ecuatoriano de Meteorología (INAMHI) es una entidad con autonomía administrativa y técnica, con representación nacional e internacional. Está adscrito a la Secretaría Nacional de Riesgo y tiene jurisdicción en todo el país. Esta entidad se encarga del manejo, monitoreo y mantenimiento de estaciones meteorológicas ubicadas en el Ecuador continental y Peninsular. Publica anuarios meteorológicos que están disponibles en su página web ([www.inamhi.gob.ec](http://www.inamhi.gob.ec)). Entre los datos que receptan las estaciones se encuentran



**Simbología**

**estaciones\_RSD**

**Estación**

- Aeropuerto
- Cancun
- Chetumal
- Chetumal
- Coahuila
- Cumbre
- El Cedral
- La Tonala
- Lázaro
- Michoacán
- Maricao
- Matamoros
- Patate
- Patate
- Quercaro
- Toluca
- Sayulita
- Surcocho
- Toluca
- Uruapan
- Yucatán

Al revisar las estadísticas de registro de datos se concluye que no existe uniformidad en cuanto a los de heliofanía. En la provincia del Azuay existen alrededor de 56 estaciones, de las cuales únicamente en la estación M045 de Palmas existen registros únicamente en dos meses entre los años 2000 y 2001. De igual manera en las estaciones meteorológicas PROMAS – INAMHI, la adquisición no es continua y se cuenta únicamente con tres estaciones.

La información existente de radiación solar utilizada para la elaboración del Atlas del Ecuador es la única homogénea disponible, que sirve para desarrollar mediante técnicas de interpolación un mapa base de radiación que servirá de comparación con los otros métodos.



### 2.6.1.5 Modelo digital de elevaciones

Como información accesible, en la web, se puede citar al ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model) propuesto por NASA y el Ministerio de Economía, Comercio, e Industria de Japón (METI), creado por las imágenes estéreo recogidas por el radiómetro japonés llamado ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), en la Imagen N°5 se muestra el MDE de la zona de Cuenca. La resolución espacial de la información es de aproximadamente 30m, liberada en el año 2009 y generada en el año 2000. También puede ser obtenido por métodos de interpolación a partir de curvas de nivel de la Cartografía Temática del IGM, la resolución será dependiente del espaciado de las Isohipsas.

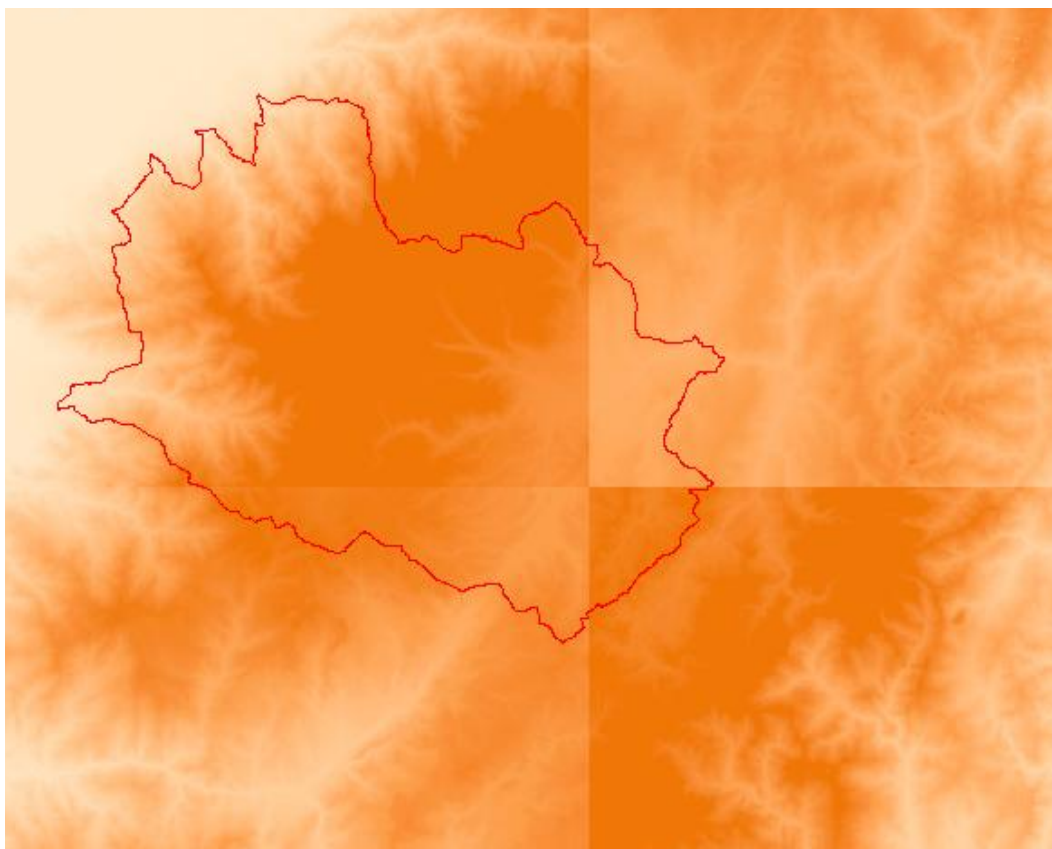


Imagen 5: MDE área Cantón Cuenca.  
Fuente: ASTER-GDEM



En la Tabla N°3 se detalla toda la información recopilada para este estudio:

Tabla N°3: Información de libre acceso recopilada

Tipo	Información				
		Escala	Tipo	Proyección	Fuente
Cartografía	Cartografía Ecuador	Varias	Vector	WGS-84	IMG
Documentos	Base datos solar Ecuador		Base de datos		CIE - CONELEC
	Atlas solar del Ecuador		Adobe acrobat		CIE - CONELEC
	Base datos meteorológica		Word - Excel		PROMAS - INAMHI
Imágenes	Imágenes satelitales diferentes años	30 - 60 metros	Imagen	WGS - 84	USGS - Digital Globe
MDT	Modelo digital terreno	60m	Raster	WGS-84	ASTER

Elaboración: Autor

## 2.7 Métodos de estimación de Radiación Solar

La información recopilada denota un monitoreo escaso, que refleja dispersión que no facilita aplicar método alguno. Los métodos que se describe a continuación servirá para comprender aquellos procesos donde se requiere información completa, entre los que se citan (Santigosa, L. M. L y R. 2010):

- i. Datos meteorológicos de estaciones: método válido si se trata de terrenos llanos y estaciones distanciadas a 10Km como máximo. Este caso no aplica ya que de la información recopilada existen únicamente dos estaciones en la zona de estudio.
- ii. Interpolar valores a partir de medidas de la radiación solar en otras estaciones: esta solución es aplicable cuando la red de estaciones de radiación solar tiene una densidad considerable y dependiendo del tipo de terreno, puede precisarse una densidad de entre 50 y 20 Km de distancia entre estaciones. No existe una red o malla de estaciones con registros de radiación.



- iii. Modelos de interpolación MDT: son procesos que consideran la topografía del terreno como dato de entrada, precisan de una densidad de estaciones de medida en el orden de los 100km.
- iv. Modelo heurístico: están concebidos específicamente para un problema dado, concebidos en la dirección a la resolución de problemas (J. Dréo, 2006). En el peor de los casos los algoritmos exactos necesitan tiempos exponenciales para encontrar los métodos óptimos, métodos aproximados, a menudo llamada heurísticos, obtienen soluciones casi óptimas con costos computacionales relativamente bajos, sin ser capaz de garantizar resultados óptimos (Stutzle., 2004). Los métodos exactos incluyen la enumeración y la programación matemática, así como muchos algoritmos especializados que se han desarrollado para problemas de optimización en particular. (ReVelle, 1997).

En el presente estudio se dispone del MDT e imágenes satelitales como datos confiables, de esta forma los métodos a desarrollar son iii, y iv.

### 2.7.1 Modelo Digital del Terreno

Durante las dos últimas décadas, la disponibilidad de herramientas computacionales y los Sistemas de Información Geográfico (SIG), ha sido significativo para el modelamiento de la radiación solar (Suri and Hofierka, 2004). Aprovechando este desarrollo, el análisis territorial en varias áreas ha tenido una favorable expansión, pudiendo de esta manera estudiar con mayor precisión los aspectos ecológico, territorial, social y económico. Por ejemplo el comportamiento de variables ambientales como: clima, temperatura, viento, humedad, pluviosidad, radiación, etc. está ligado a la variación altitudinal que presenta el terreno, a mayor o menor altura se favorecen ciertos hábitats caracterizados por el comportamiento de las variables, así mismo propician la supervivencia de ciertas especies.

La forma del terreno, expresada en un Modelo Digital de Elevaciones, influye directamente sobre el comportamiento de la radiación por la inclinación de la



superficie o pendiente, relación de aspecto y efectos de sombras. La generación de modelos basados en el análisis de estas propiedades del terreno permite realizar estimaciones eficientes y precisas de radiación solar sobre largas franjas territoriales. (Hofierka and Suri, 2002).

Dentro de las aplicaciones SIG destaca el modulo *Solar Analyst* desarrollado por ArcGis y *r.sun* desarrollado para GrassSIG (Suri, M., and J. Hofierka, 2004). Estos modelos estiman la radiación global en condiciones de cielo despejado y la suma de los componentes de: haz, difusión y reflexión dados para un día determinado, latitud, superficie y condiciones atmosféricas. La dificultad radica en el tratamiento de la radiación difusa ya que depende del clima y de las condiciones regionales del terreno. De esta forma se genera uno de los errores de estimación, sin embargo de lo cual el cálculo del componente de haz es sencillo. (Hofierka and Suri, 2002).

La interacción de la radiación solar con la atmósfera y superficie terrestre es determinada por 3 grupos de factores:

- La geometría de la tierra, revolución y rotación: declinación, latitud, ángulo solar horario;
- Terreno: elevación, inclinación superficie (pendiente), y orientación (sombras);
- Atenuación atmosférica: absorción
  - o Gases: moléculas de aire, ozono, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>.
  - o Partículas sólidas y líquidas: aerosol, incluyendo agua no-condensada.
  - o Nubes: agua condensada.

El primer grupo de factores determina la radiación extra-terrestre disponible basada en la posición solar sobre el horizonte y puede ser determinada por fórmulas astronómicas.



El modelo computacional SIG opera en dos módulos, el primero calcula el ángulo de incidencia solar [ángulos] e irradiancia solar [ $\text{Wm}^{-2}$ ] y en el segundo la suma diaria de irradiación solar [ $\text{Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ] y la duración del haz de irradiación son calculadas en un día dado.

A partir del modelo digital de elevación se obtiene el modelo de pendientes y aspecto. Los parámetros de número de día (día juliano) y la hora solar local, se ajustan al análisis del día o días del año de análisis. La tabla N° 4 recopila los tipos de datos y valores utilizados en la modelación solar.

Tabla N° 4: Tipo datos y valores para modelación solar

Nombre parámetro	Tipo de dato	Descripción	Módulo	Unidades	Intervalo de valores
<i>elevin</i>	raster	elevación	1 - 2	metros	0 -4300
<i>aspin</i>	raster	aspecto (panel azimuth)	1 - 2	grados decimales	0 -360
<i>slopein</i>	raster	pendiente (inclinación panel)	1 - 2	grados decimales	0 - 90
<i>linkein</i>	raster	turbiedad atmosférica	1 - 2	adimensional	0 - $\approx 7$
<i>lin</i>	Valor simple	turbiedad atmosférica	1 - 2	adimensional	0 - $\approx 7$
<i>albedo</i>	raster	albedo terrestre	1 - 2	adimensional	0 - 1
<i>alb</i>	Valor simple	albedo terrestre	1 - 2	adimensional	0 - 1
<i>latin</i>	raster	latitud	1 - 2	adimensional	-90 - 90
<i>lat</i>	Valor simple	latitud	1 - 2	adimensional	-90 - 90
<i>coefbh</i>	raster	índice de cielo claro por componente irradiación	1 - 2	adimensional	0 - 1
<i>coefdh</i>	raster	índice de cielo claro por componente difusa	1 - 2	adimensional	0 - 1
<i>day</i>	Valor simple	Numero de día	1 - 2	adimensional	1 - 365
<i>declin</i>	Valor simple	declinación solar	1 - 2	radianes	-0.40928 - 0.40928
<i>time</i>	Valor	hora local (solar)	1	horas	0 - 24

	simple			decimales	
<i>step</i>	Valor simple	paso tiempo	2	horas decimales	0.50 - 1.0
<i>dist</i>	Valor simple	muestreo coeficiente distancia para sombra	1 - 2	adimensional	0.1 - 2.0

Fuente: The solar radiation model for Open source GIS

Elaborado: Autor

La información digital del terreno (Imagen 5 - ASTER) es procesada mediante análisis SIG con los módulos propuestos por Suri, M., and J. Hofierka, 2004, en la Imagen 6 se muestra el área urbana/rural correspondiente al MDE de Cuenca.

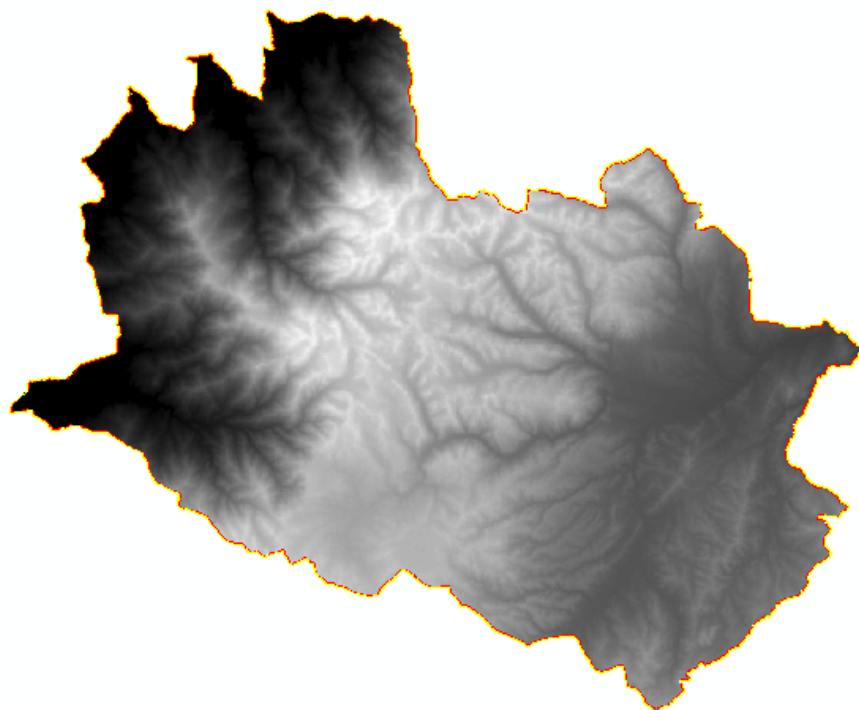


Imagen 6: MDE Área Cantón Cuenca

Elaborado: Autor

A partir del archivo de imagen MDT se extrae el mapa de pendientes (raster) que es la modelación del terreno por cambios de alturas. Las imágenes N° 7 y N° 8 muestran el resultado del mapa de pendientes y aspecto respectivamente.



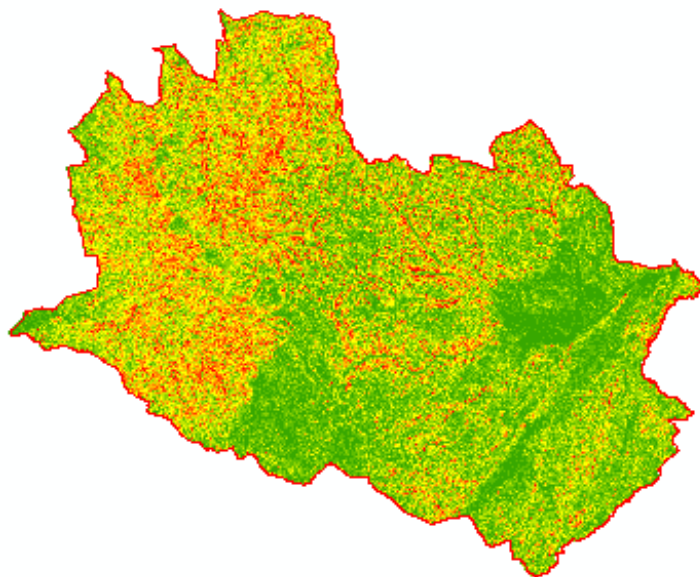


Imagen 7: Mapa de pendientes a partir del MDT (resolución 100m)  
Elaborado: Autor

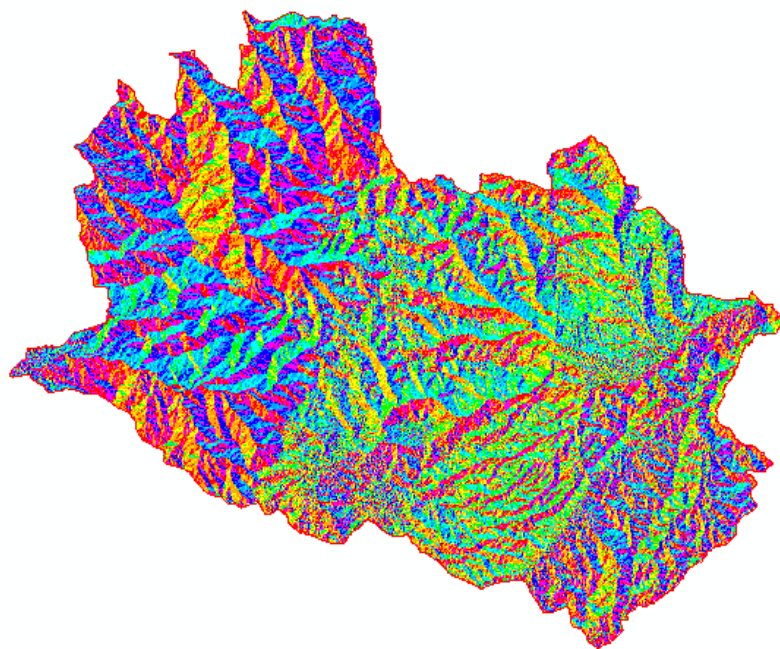


Imagen 8: Mapa de aspectos. Resolución 100m  
Elaborado: Autor





El mapa de pendientes es el que indica la inclinación del terreno, mientras que el mapa de aspecto es la iluminación que recibe el terreno de acuerdo a la posición del sol.

Las relaciones utilizadas para la determinación de la radiación solar en función de variables ambientales han sido de utilidad en el establecimiento del método propuesto por Suri, M., and J. Hofierka, 2004, donde la ecuación de radiación global (Ecuación. N° 5) en modelos computacionales para estimación de radiación es:

$$G_{hc} = B_{hc} + D_{hc} \quad (\text{Ecuación N° 5})$$

donde:

$G_{hc}$  = radiación global horizontal,  $B_{hc}$  = radiación directa,  $D_{hc}$  = radiación difusa

El ángulo de incidencia solar del mapa raster es calculado especificando la elevación del raster (MDE), aspecto y la pendiente, para un día local y hora local de acuerdo a la zona de estudio. El día local es el número del día en el calendario anual general donde el día 01 de Enero es el día 01 y el día 31 de Diciembre es el día 365 (día Juliano); mientras que el tiempo de la hora local corresponde a la hora en sistema decimal. El mapa raster de salida contiene la suma de los componentes de las tres radiaciones calculadas para un día determinado mediante la integración de la irradiancia pertinente entre la salida del sol y puesta del sol para ese día. El valor de incremento horario es de 0.5h que puede ser modificado a pasos enteros generando resultados menos fiables. Las unidades de salida están en Wh por metro cuadrado de día dado ( $\text{Wh m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ).

La radiación extraterrestre (Ecuación N° 6) puede ser calculada para cualquier día dado del año y latitud, de acuerdo a las relaciones propuestas por Duffie y Beckman (1980):



$$Ra = \left(\frac{24 \times 60}{\pi}\right) G_{sc} d_r [\omega_s \sin \delta \sin \phi + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s] \text{ (Ecuación N° 6)}$$

donde:  $G_{sc}$  = constante solar cuyo valor es de  $0.082 \text{ [MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}]$ ;

$d_r$  es la corrección de la excentricidad de la órbita de la tierra alrededor del sol en el día  $i$  del año, determinada por la Ecuación N° 7:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} i\right)$$

$\omega_s$  es el ángulo horario del amanecer (radianes), Ecuación N° 8:

$$\omega_s = \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta);$$

$\delta$  es la declinación del sol alrededor del ecuador celestial en radianes en el día  $i$  del año, Ecuación N° 9:

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} i - 1.39\right);$$

$\phi$  es la latitud en radianes convertida de latitud ( $L$ ) en grados, Ecuación N° 10:

$$\phi = \frac{\pi L}{180};$$

Con estas relaciones se pueden obtener la radiación solar incidente sobre el terreno, expresada en la Ecuación N° 11:

$$R_s = R_a \times T_t;$$

donde  $R_s$  es la radiación solar en la superficie de la Tierra [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ],  $R_a$  es la radiación solar extraterrestre, y,  $T_t$  es la trasmisividad atmosférica. La determinación de  $T_t$  se basa en coeficientes empíricos, diferenciales de temperatura, nubosidad, horas de amanecer diario (Ball. et al., 2004).

Para el análisis de la información de pendientes y aspecto (slope and aspect) es recomendable realizar una clasificación por promedio en intervalos discretos para



asignar a cada celda (pixel) un valor simple de clase (M, Bezzi - A, Vitti. 2005). En la Tabla N° 5 se indica la reclasificación de pendientes utilizada:

Tabla N°5: Rangos reclasificación para pendientes

Clase	1	2	3	4	5	6
Valor (°)	0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 90

Fuente: Marco Bezzi, Alfonso Vitti.  
Elaborado: Autor

Igual proceso se realiza para la reclasificación del dato de aspecto, indicado en la Tabla N°6:

Tabla N°6: Rangos reclasificación para aspecto

Clase	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Valor (°)	-1 - 0	0 - 45	45 - 90	90 - 135	135 - 180	180 - 225	225- 270	270- 315	315-90

Fuente: Marco Bezzi, Alfonso Vitti..  
Elaborado: Autor

Las clases de aspecto y pendiente son combinadas entre sí obteniendo el índice morfológico, para realizar estimaciones de radiación solar directa mediante el contraste de características del terreno. Esta clasificación combinada será utilizada en el modelo de estimación lineal para sobre-imponer en un método de interpolación, kriging, un estimador de media local. Los valores de combinación de aspecto y pendiente obtenidos se indican en la Tabla N° 7:

Tabla N° 7: Combinación aspecto - pendiente

Pendiente clase	Aspecto clase								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	11	21	31	41	51	61	71	81	91
2	12	22	32	42	52	62	72	82	92
3	13	23	33	43	53	63	73	83	93
4	14	24	34	44	54	64	74	84	94
5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
6	16	26	36	46	56	66	76	86	96

Elaborado: Autor



En el área seleccionada, Cantón Cuenca, el modelo físico se aplica para obtener radiación solar directa generada por cada celda de la grilla en el MDE, donde los datos obtenidos serán usados como dato de entrada para el proceso de interpolación.

### 2.7.2 Métodos Heurísticos

En este tipo de métodos, cuando la solución puede guiar a solucionar otros problemas se denomina *Meta heurísticos*, de acuerdo a la definición de Glover y Kochenberger (2003) como la *solución que maneja una interacción entre procedimientos desarrollados y estrategias de más alto nivel para crear un proceso capaz de escapar de óptimos locales y realizar una búsqueda de una robusta solución*.

La solución heurística busca una relación en la proximidad espacial como un promedio para identificar áreas compactas en datos raster. La proximidad o adyacencia es implícitamente expresada por las coordenadas de las matrices que representan los mapas raster. Church et al (2003) y Brookes (2001a) presentan directrices del método empezando desde una *célula semilla* con el fin de identificar un subconjunto de otras para formar un área compacta por medio de un proceso de crecimiento de las células vecinas de la semilla de características semejantes y añadirlas de tal manera que se forme una nueva región.

Este proceso es iterado hasta obtener un número dado de unidades de área reunidos en una región. Brookes (2001a) incluye una forma idónea para cada vecino cercano determinado por la distancia y dirección de la semilla, la forma es combinada con la celda por el promedio de las dos idoneidades, la célula con el mayor promedio es añadida a la región formada. El proceso de crecimiento del parche o áreas comunes se forma de manera randómica en la que se comparan dentro de todo el mapa raster aquellas con igual forma característica.



La utilidad de este tipo de soluciones en problemas generales basa en la implementación de cuatro objetivos: minimización de costos y desarrollo, minimizar la de equipamiento (datos), maximizar la distancia del detractor, y minimizar el producto del perímetro y el diámetro de las celdas. El algoritmo desarrollado por Gilbert et al. [1985] identifica un subconjunto de soluciones eficientes (generación parcial del conjunto eficiente).

El primer paso en el análisis multicriterio, es generar semillas de regiones formadas por un conjunto de celdas individuales con sitios idóneos para maximizar múltiples criterios. Un pixel es considerado óptimo cuando mantiene los más altos niveles para cada criterio considerado como parte de un problema de decisión. Pero cuando los valores máximos no coinciden en el mismo pixel, los píxeles sub-óptimos deben ser seleccionados a través de un proceso iterativo.

Los Autómatas celulares son (Aguilera, 2006): un plano bidimensional o un espacio n-dimensional dividido en un número de subespacios homogéneos, conocidos como celdas o píxeles. Cada celda puede estar en uno de un conjunto finito de estados y una vecindad es definida para cada celda. Una regla de evolución define el estado de cada celda, dependiendo del estado inmediatamente anterior en su vecindad.

El limitante de estos métodos es la necesidad de contar con información en el tiempo, generalmente se utiliza para determinar cambios de uso de suelo, expansiones urbanas, cambios en sistemas de transporte, entre otros. En este estudio se analizará la posibilidad de su aplicación en la determinación de energía solar directa sin dependencia de información adicional no disponible, sea de uso de suelo o asentamientos urbanos.



### 2.7.2.1 Análisis de imágenes satelitales

La estimación de la radiación solar a partir de imágenes satelitales, mediante modelos de estimación (Ecuación N° 12), permite evaluar la irradiancia global en cada pixel de la imagen:

$$G_i = f(x,y,d,h) \text{ (Ecuación N° 12)}$$

Donde:

- (x,y) representan las coordenadas del pixel en la imagen correspondientes a (X,Y) en la superficie de la tierra.
- (d, h) son el día y la hora de adquisición de la imagen.
- 

El valor de la irradiancia global es calculado en cada pixel a partir del valor de la brillancia original de la imagen, cálculo basado en el balance energético del sistema tierra - atmósfera:

Las imágenes a tratar son del tipo de mapa de bits, tienen como unidad principal el pixel que contienen información de ubicación y color, con un tamaño definido y determinado por la resolución de la imagen. La resolución de una imagen de mapa de bits está dada por la cantidad de píxeles concentrados por unidad de medida, en una relación directa que determina que a mayor concentración mejor calidad de la imagen y a la vez mayor tamaño (peso) del archivo.

En el tratamiento de imágenes de satélite para el cálculo de la radiación solar, una imagen es en realidad una tabla de valores que representa el valor detectado por el radiómetro del satélite en un área de terreno determinada. El uso de datos de satélite para la estimación de la radiación solar, representa una alternativa válida en las medidas terrestres de estas variables. Los modelos físicos son las más comunes para el análisis. Estos modelos se basan en consideraciones físicas que permiten que los intercambios de energía radiante que tienen lugar dentro del sistema Tierra-atmósfera sean representados explícitamente. En primera instancia se consideran los coeficientes de dispersión y absorción de los componentes de



la atmósfera clara, el albedo de las nubes, y los coeficientes de absorción de las mismas y el albedo superficial. Su ventaja radica en su generalidad ya que no dependen de una región en particular y pueden ser aplicados en cualquier lugar. Además no necesitan de datos terrestres de medidas de radiación global; sin embargo precisan de datos meteorológicos complementarios para determinar la interacción de la radiación solar con la atmósfera.

La deficiencia de información meteorológica con registros solares en la región no faculta la aplicación de este tipo de modelos ya que se necesitaría de éstos para cotejar los coeficientes y resultados obtenidos.

### **2.7.2. 2 Corrección geométrica**

Esta información, como se describió en la sección 2.5.1.1 debe someterse a un proceso de corrección geométrica y radiométrica dependiendo de su necesidad. Las imágenes satelitales "crudas" deben someterse a un proceso de rectificación mediante la ayuda de otra información sea imagen o cartografía que corresponda a coordenadas y sistema de proyección identificados en el territorio mediante los puntos de control.

Las imágenes analizadas corresponden a la base de datos de USGS (<http://www.glovis.usgs.gov>), Digital Globe, analizando características como: baja nubosidad, resolución, área de cobertura y en donde se pueda cotejar con la Cartografía de libre acceso del IGM.

En el sitio web de USGS existe una base de datos de imágenes satelitales de libre acceso con datación del año 1984 (L-4) hasta el año 2001 (<http://earthexplorer.usgs.gov/metadat>), geodatabase de USGS de donde se descargó las imágenes correspondientes a la zona de estudio (Tabla N° 8), luego de un escogitamiento de aquellas que mejor resolución (30m) y presentación poseen.



Tabla N° 8: Imagen satelital LANDSAT para estudio

Spacecraft Identifier	Attribute value	Fecha toma	Calidad bandas	Proyección, Datum, Elipsoide	Grid Cell Size	Resampling	Azimuth	Elevación sol
LANDSAT - 5	LT50100621998195XX X01	1998/07/14	9/10	WGS-84	30	Cubic_convolution		
LANDSAT - 5	LE70100622001211ED C00	2001/07/03	9/10	WGS-84	30	Cubic_convolution	54.47	52.23

La gran utilidad en los análisis del medio que permiten las imágenes satelitales ha propiciado la formulación de métodos y modelos de predicción del comportamiento de las variables ambientales en general, sin embargo muchos procesos de "refinación" de las imágenes son necesarios. Esta refinación recurre a diversas fuentes de información secundaria, siendo una de éstas la corrección geométrica. En este sentido The Scientific Data Purchase Program of NASA's Stennis Space Center ha dirigido la producción de imágenes LANDSAT Multispectral Scanner (MS), Thematic Mapper (ETM+) globales ortorectificadas y co-registradas para los tres períodos siguientes: 1970, circa 1990 y circa 2000 respectivamente (Becker et al, 1998; IGBP, 1990; WMO, 1992).

El proceso de ortorectificación remueve errores de desplazamiento de la imagen causada por la interacción entre la elevación del terreno y la variación de la orientación del sensor. Los puntos geodésicos y de control fueron proporcionados por The National Imagery and Mapping Agency (NIMA), estos datos no son de acceso público.

Este proceso utiliza modelos matemáticos del vecino próximo y convolución cúbica para calcular los valores de intensidad asignados a los píxeles de la imagen ortorectificada.





Las imágenes poseen una resolución de hasta 30m, y están sometidas a procesos de georeferenciación, de acuerdo al método descrito anteriormente. Cuando el error cuadrático medio presenta valores menores a 0.80, indica que el proceso de georeferenciación propio de la imagen es válido (J.Tucker Denelle M.2004). Utilizando la información cartográfica oficial disponible del Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:25000, se pudo comprobar que la georeferenciación de la imagen en la fuente de descarga registra un desplazamiento de 10m, respecto de la Cartografía del IGM. La resolución puede ser mejorada (30x30 a 15x15) mediante la fusión de la imagen con su banda pancromática utilizando el método Spectral Sharpening (M,Neteler. H Mitasova. 2004). La Tabla N° 9 especifica las coordenadas del área de cobertura de las imágenes:

Tabla N° 9: Cobertura imagen satelital

	Lat	Long	Norte (Y)	Este (X)
NW	1° 57' 15.12" S	79° 50' 14.28" W	9785437	629313
NE	2° 11' 59.64" S	78° 08' 17.52" W	9758204	818345
SE	3° 50' 20.40" S	78° 28' 59.88" W	9578160	779516
SW	3° 35' 34.44" S	80° 11' 08.16" W	9605549	590449

Fuente: Glovis Visualization Viewer (USGS) <http://glovis.usgs.gov/>

Elaboración: Autor

Dentro del área de la imagen satelital se identifica que la zona correspondiente al Cantón Cuenca es aquella que mejor calidad presenta en cuanto a claridad y nubosidad (ver Imagen N° 9), es por ello esta región se toma como punto de partida para la evaluación por medio de los métodos descritos.

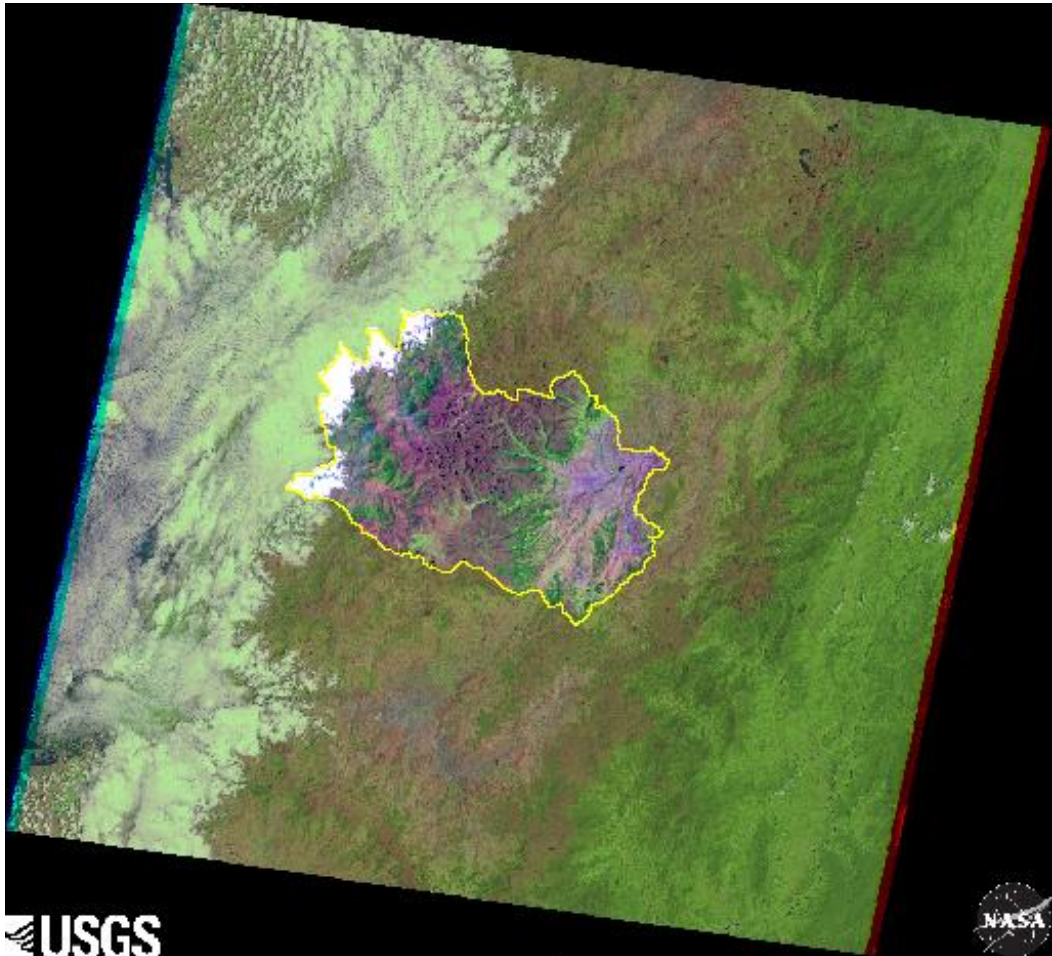


Imagen N° 9: LANDSAT - 5 del año 2001, se aprecia mejor cobertura la zona de la Ciudad de Cuenca

Fuente: Glovis Visualization Viewer (USGS) <http://glovis.usgs.gov/>  
Elaboración: Autor

## 2.8 Métodos de interpolación

Las herramientas estadísticas son básicas para el análisis de datos en todas las áreas del conocimiento, su crecimiento ha generado nuevas metodologías centradas en fundamentos probabilísticos comunes; en el ámbito ambiental los análisis han cobrado importancia significativa por la innovación en técnicas de adquisición de datos, así se da apertura a una nueva rama de la estadística



denominada *environmetrics* (estadística ambiental) con el propósito de predecir valores de las variables en sitios no muestreados.

La Estadística espacial es la reunión de un conjunto de metodologías apropiadas para el análisis de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios de una región. Trata con el análisis de realizaciones de un proceso estocástico  $\{Z(s): s \in D\}$  en el que  $S \in R^d$  representa una ubicación en el espacio euclidiano adimensional,  $Z(S)$  es una variable aleatoria en la ubicación  $s$  y  $s$  varía sobre un conjunto de índices  $D \subset R^d$ . (R. Giraldo, 1997).

La geoestadística es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales (Journel & Huijbregts, 1978). Su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos (Myers, 1987). Esta herramienta ofrece una manera de describir la continuidad espacial, que es un rasgo distintivo esencial de muchos fenómenos naturales, y proporciona adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventajas de esta continuidad (Isaaks & Srivastava, 1989). Petitgas (1996), la define como una aplicación de la teoría de probabilidades a la estimación estadística de variables espaciales.

### 2.8.1 Distancia Inversa Ponderada (IDW)

Asume que cada punto en el conjunto de datos tiene una influencia local que disminuye con la distancia y que por lo tanto los valores de los puntos cercanos al de interés tienen mayor importancia o peso en el valor que será asignado al mismo. El peso asignado a cada valor  $Z'$  está dado por la Ecuación N° 13:

$$P = 1 / (d)^m; \text{ donde: (Ecuación N° 13)}$$

- $P$  = peso o ponderación que se aplicará a  $Z$ ;
- $m$  = exponente seleccionado por el investigador, define la influencia local de cada uno de los puntos en el conjunto de datos.



- $d$  = distancia entre el punto que se interpola y los vecinos más cercanos utilizados en la interpolación.

El valor de cada punto interpolado es el expresado en la Ecuación N° 14:

$$Z' = \frac{Z_i \times \frac{1}{d^m}}{\frac{1}{d^m}} \quad (\text{Ecuación N° 14})$$

### 2.8.2 Metodología Kriging

La palabra kriging procede del nombre del geólogo sudafricano D.G Krige quien realizó los primeros métodos de interpolación espacial. Esta técnica encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción, entre los tipos de kriging se indican en la Tabla N° 10:

Tabla 10. Tipos de predictores kriging y sus propiedades

Tipo de predictor	Nombre	Propiedades
Lineal	Simple	Son óptimos si hay normalidad variada.
	Ordinario Universal	Independiente de la distribución son los mejores predictores linealmente sesgados.
No lineal	Indicador Probabilístico Log Normal, Trans Gaussiano Disyuntivo	Son predictores óptimos

Fuente: Introducción a la Geoestadística. Teoría y aplicación.

Elaborado: Autor



Cuando el objetivo es hacer predicción, la geoestadística opera básicamente en dos etapas. La primera es el análisis estructural, en la cual se describe la correlación entre puntos en el espacio. En la segunda fase se hace predicción en sitios de la región no muestreados por medio de la técnica kriging. Este es un proceso que calcula un promedio ponderado de las observaciones muestrales. Los pesos asignados a los valores muestrales son apropiadamente determinados por la estructura espacial de correlación establecida en la primera etapa y por la configuración de muestreo (Petitgas, 1996).

En estudios relacionados al análisis de variables ambientales, donde el uso del modelo digital de elevación y variables derivadas de características topográficas como: pendiente, aspecto, altitud y posición geográfica pueden ser utilizados para perfeccionar la validación de los mapas. (Wang. et al., 2006; Daly et al., 2008), estas variables permiten un análisis ambiental más extenso especialmente por su distribución en el territorio. La técnica kriging y sus derivados como: IDW, co-kriging, universal kriging y kriging con derivada externa (KED) son las más aproximadas para interpolar variables meteorológicas. (Hudson and Wackernagel, 1994; New et al., 2000; Apaydin et al., 2004; Spadavecchia and Williams, 2009). Goovaerts (2000).

### 2.8.2.1 Kriging Ordinario

En suposición que se hacen mediciones de la variable de interés  $Z$  en los puntos  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , de la región de estudio, es decir se tienen realizaciones de las variables  $Z(x_1), \dots, Z(x_n)$ , y se desea predecir  $Z(x_0)$ , en el punto  $x_0$  donde no hubo medición. En esta circunstancia, el método kriging ordinario propone que el valor de la variable puede predecirse como una combinación lineal de las  $n$  variables aleatorias, como se indica en la Ecuación N° 13:

$$Z^*(x_0) = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \lambda_3 Z(x_3) + \lambda_4 Z(x_4) + \lambda_5 Z(x_5) + \dots + \lambda_n Z(x_n)$$



$$Z^*(x_o) = \sum_{i=0}^n \lambda_i Z(x_i)$$

en donde los  $\lambda_i$  representan los pesos o ponderaciones de los valores originales. Dichos pesos se calculan en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto donde se va a hacer la correspondiente predicción. La suma de los pesos debe ser igual a uno para que la esperanza del predictor sea igual a la esperanza de la variable. Esto último se conoce como el requisito de insesgamiento.

Estadísticamente la propiedad de insesgamiento se expresa a través de la Ecuación N° 14:

$$E(Z^*(x_o)) = E(Z(x_o)) \text{ (Ecuación N° 14)}$$

donde se dice que  $Z^*(x_o)$  es el mejor predictor porque los pesos se obtienen de tal manera que minimicen la varianza del error de predicción (Ecuación N° 15), es decir que minimicen la expresión:

$$V(Z^*(x_o) - Z(x_o)) \text{ (Ecuación N° 15)}$$

Esta última es la característica distintiva de los métodos kriging, ya que existen otros métodos de interpolación como el de distancias inversas o el poligonal, que no garantizan varianza mínima de predicción (Samper y Carrera, 1990). La estimación de los pesos se obtiene minimizando la varianza del error, Ecuación N° 16:

$$V [Z^*(x_o) - Z(x_o)] \text{ sujeto a } \sum_{i=0}^n \lambda_i = 1 \text{ (Ecuación N° 16)}$$

Los otros métodos de predicción espacial se citan a continuación. Un estudio riguroso de ellos puede hacerse en Cressie (1993), Deutsch y Journel (1992) y Samper y Carrera (1990).

Estos procesos favorecen la elaboración de métodos computacionales, donde permiten determinar la mejor aproximación de los resultados, en función de la



validación del ajuste o grado del error obtenido, en el siguiente Diagrama N° 1 se indica la composición de un diagrama de flujo con análisis geo-estadístico:

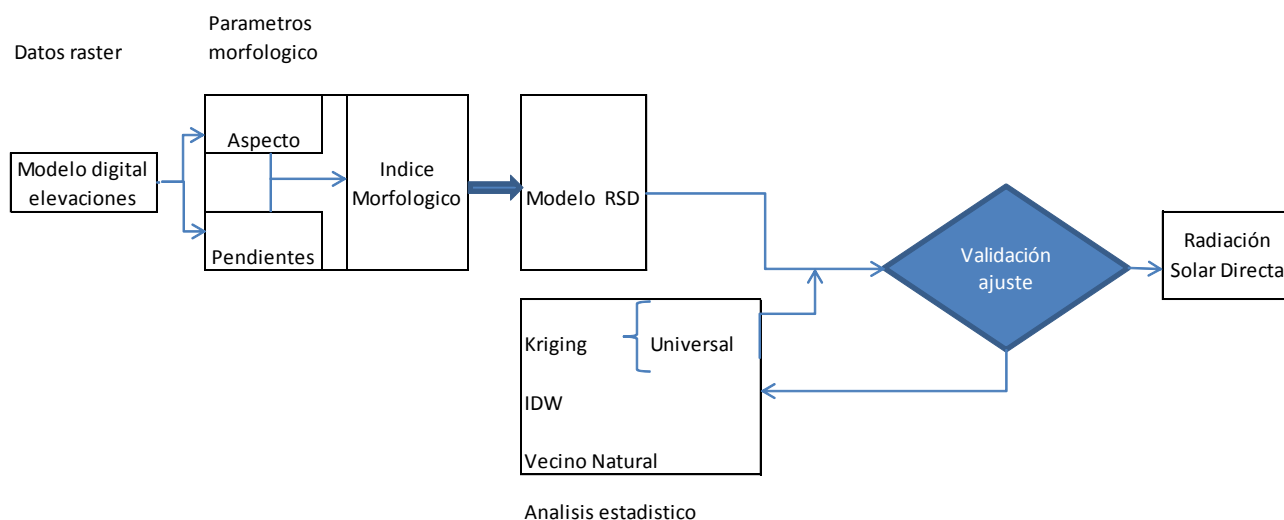


Diagrama 1: Flujo obtención Radiación Solar Directa - Técnica interpolación  
Elaboración: Autor

Para realizar un mapa de predicciones con el método Kriging es necesario realizar dos tareas: descubrir las reglas de dependencia y realizar las predicciones, debiendo pasar por dos pasos para completar el método:

- Crear los variogramas y las funciones de covarianza para calcular los valores de dependencia estadística (autocorrelación espacial) que dependen del modelo de autocorrelación llamado ajuste de modelo.
- Calcular los valores desconocidos realizando las predicciones.

El método de interpolación Kriging se basa en los siguientes supuestos:

1. Los datos muestran un patrón de variabilidad espacial que puede definirse a través de:

- Un componente estructural asociado a un promedio constante o a una tendencia constante.
- Un componente aleatorio con cierto grado de asociación espacial.





- Un componente de error o variabilidad no explicada asociada a errores en las mediciones y a microvariaciones en la superficie no detectadas por el modelo.

Los conceptos anteriores pueden expresarse matemáticamente como (Burrough, 1986), se indica en la Ecuación N° 17:

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon(x) + \varepsilon\varepsilon \quad (\text{Ecuación N° 17})$$

Donde:

$Z(x)$ : valor de la variable  $Z$  en la posición  $x$ .

$m(x)$ : función determinística que describe el componente estructural asociado al set de datos.

$\varepsilon(x)$ : variación estocástica local que permanece en el set de datos después de remover la variación estructural dada por  $m(x)$ .

$\varepsilon\varepsilon$ : residuos que representan variabilidad sin una tendencia espacial en el set de datos, con promedio igual a 0 y varianza  $\phi^2$ .

En ausencia de una tendencia en los datos se asume que la variación entre  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$  depende exclusivamente de la distancia entre los sitios o sea del valor de  $h$  (resago), matemáticamente se puede expresar en Ecuación N° 18 (Oliver, 1990):

$$\text{Var} [Z(x) - Z(x+h)] = E [Z(x) - Z(x+h)]^2 = 2 \quad (\text{Ecuación N° 18})$$

En donde  $h$  se conoce como el semivariograma, que es la representación gráfica de la semivarianza espacial con respecto a una distancia  $h$ . Este valor es la mitad del promedio de la diferencia entre cada par de datos y a línea de 45°.

### 2.8.3 Vecino Natural

Este método utiliza la distribución espacial de los Polígonos de Thiessen, a partir de los cuales se crean nuevos polígonos basándose en áreas proporcionales para





interpolarse un valor (Sibson, 1981). También se conoce como interpolación de Sibson o de "robo de área". Sus propiedades básicas son que es local, utiliza sólo un subconjunto de muestras que circundan a un punto de consulta y asegura que las alturas interpoladas estarán dentro del rango de las muestras utilizadas. No infiere tendencias ni produce picos, depresiones, crestas o valles que no estén ya representados por las muestras de entrada. La superficie pasa por las muestras de entrada y es suave en todas partes, excepto en las ubicaciones de las muestras de entrada.



## CAPITULO III

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se procede al análisis de la información recopilada indicada en la Tabla N° 3, enfocándose en los objetivos propuestos de evaluación métodos matemáticos y heurísticos, mejor técnica estadística que permita su modelación.

Los datos pueden clasificarse como raster y vector, los primeros cuenta con una resolución de 30mx30m que será remuestreada a 100, 500 y 1000m.

#### 3.1 Estaciones meteorológicas - Atlas solar

Como se indicó en el ítem 2.7 (i y ii) se dispone de estaciones meteorológicas en la zona pero no poseen registros unificados de información solar, se procedió a extraer la base de datos correspondientes al Cantón Cuenca, datos de coordenadas (Este, Norte) - radiación solar directa: (global), e identificar aquellos datos cercanos a las estaciones ubicadas en el territorio. La finalidad es determinar la cobertura de monitoreo y la fiabilidad de los datos registrados para su posterior utilización en proyectos enlazados al aprovechamiento de energía solar.

El análisis consiste en realizar regresión múltiple entre las variables de coordenadas (Este, Norte) como variables independientes y la correspondiente en radiación, que es la variable dependiente, indicada en la siguiente ecuación:

$$Y' = a' + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (\text{Ecuación N° 18})$$

Se resuelve, planteando un sistema de 3 ecuaciones (Ecuación N° 19), por métodos de mínimos cuadrados:

$$\begin{aligned} \sum y &= n a + b_1 \sum x_1 + b_2 \sum x_2 \\ \sum x_2 y &= a \sum x_2 + b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2 \\ \sum x_1 y &= a \sum x_1 + b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 \end{aligned}$$



La fiabilidad de los resultados del proceso se puede determinar mediante el error estándar de la regresión múltiple ( $S_{xy}$ ), medida de dispersión expresada en la Ecuación N° 20, donde la estimación se hace más precisa conforme el grado de dispersión alrededor del plano de regresión se hace más pequeño.

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum(Y-Y')^2}{n-m-1}}, \text{ (Ecuación N° 20)}$$

donde:

Y = valores observados de la muestra,

Y' = valores estimados a partir de la ecuación de regresión,

n = número de datos,

m = número de variables dependientes.

El coeficiente que mide la tasa porcentual de los cambios de "Y" se denomina coeficiente de determinación múltiple ( $r^2$ ) que puede ser determinado y explicado por las variables independientes (Este, Norte). (Cannavos G, 1995).

Resultados:

Tomando toda la base de datos entera seleccionada para el Cantón Cuenca se obtuvieron los siguientes datos estadísticos resumidos en la Tabla N° 10:

Tabla N° 10: Estadísticas de regresión	
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,4553
Coeficiente de determinación $R^2$	0,2073
<b><math>R^2</math> ajustado</b>	<b>0,2068</b>
Error típico	195,8165
Observaciones	3099

El valor de  $R^2$  debería ser representativo de la correspondencia entre los datos de mediciones y predicciones, sin embargo resulta que únicamente el 20.68% de los



datos pueden ser predichos por los coeficientes de la ecuación de regresión indicados en la Tabla N° 11:

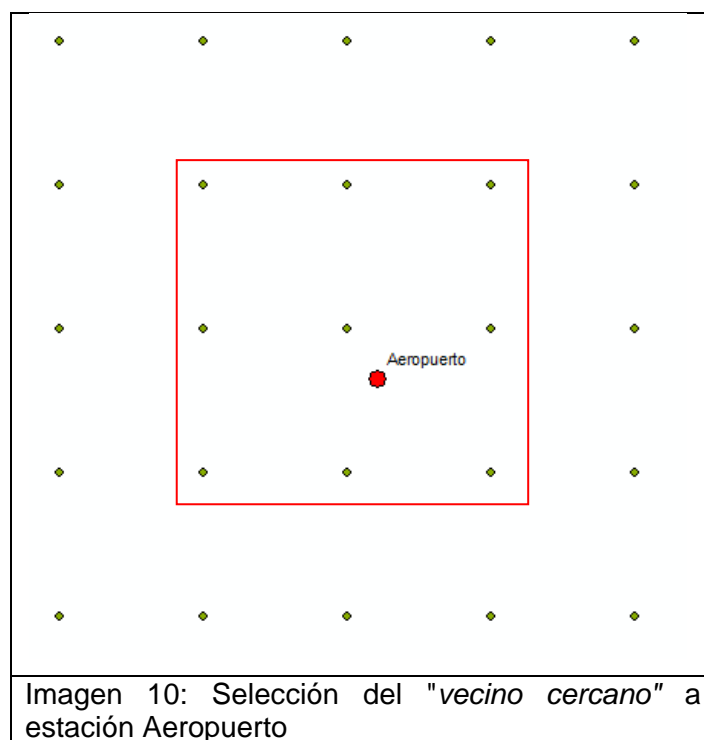
Tabla N° 11: Coeficientes predicción

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico</i>	
			<i>t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	-53132,40	2596,40	-20,46	0,00
Este	-0,001492	0,000196	-7,599	0,00
Norte	0,005822	0,000262	22,199	0,00

Siendo la regresión estimada obtenida para todo el conjunto de datos la expresada en la Ecuación N° 21:

$$Y' = 53132.4 - 0.00149 E + 0.00582 N \text{ (Ecuación N° 21)}$$

Por ello se optó por ubicar geográficamente cada estación y extraer los datos de radiación de los "*vecinos cercanos*" y así obtener una relación de regresión múltiple para cada estación que permita estimar el valor de radiación solar con base del Atlas Solar, ejemplo indicado en la Imagen N° 10.





Tomando como ejemplo la estación de Aeropuerto (Tabla N° 12) seleccionando 9 vecinos cercanos a una distancia de 1km, se obtuvieron los siguientes resultados de regresión múltiple:

Tabla N° 12: Estadísticas regresión estación Aeropuerto

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,9993
Coeficiente de determinación $R^2$	0,9987
<b><math>R^2</math> ajustado</b>	<b>0,9983</b>
Error típico	0,99958
Observaciones	9

Los datos muestran una correlación más compacta, denotada por el valor del coeficiente de determinación múltiple  $R^2$  de 0.99 (Tabla N° 13), indicando que el 99.83% de los datos pueden ser predichos con la Ecuación N° 21:

$$Y' = -52890.03 + 0.0279 E + 0.003605 N \text{ (Ecuación N° 21)}$$

Tabla N° 13: Coeficientes regresión estación Aeropuerto

	<i>Estadístico</i>			
	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	-52890,030	3961,667	-13,3504	1,0929E-05
Este	0,02797	0,00040808	68,5612	6,477E-10
Norte	0,003605	0,00040808	8,83410	0,0001169

Realizando la comparación entre regresiones en la estación Aeropuerto (Tabla N° 14), se puede notar que la opción del vecino cercano entrega mejores resultados.

Tabla N° 14: Valores predicción estación Aeropuerto

Datos	Valor predicción	Media	Coef. Var
Datos todos	2147.53	2195.90	0.100
Vecino cercano	2270.032	2265.26	0.0108

En la Tabla N° 15 se especifican las relaciones obtenidas con el mismo procedimiento para la zona del Cantón Cuenca tomando como referencia la



ubicación de las estaciones. Donde: X datos corresponde a la media de datos del Atlas Solar correspondiente a la zona del "vecino cercano"; Valor.pre especifica el valor de valor predicción; y Dispersión el valor dispersión entre la media y el de predicción. Estos datos simulan el registro de radiación solar en cada estación en  $\text{Wh-m}^2/\text{día}$ .

Tabla N° 15: Análisis IDW para radiación estimada en estaciones

Estación	Regresión estación	$R^2$	Valor.pre	X datos	C.Var
Ucubamba	$Y' = -83588.82 - 0.0149 E + 0.0100 N$	0.986	2374.95	2385.67	0.0074
La Toreadora	$Y' = -230813.65 - 0.0227 E + 0.0256 N$	0.999	1979.2	1978.88	0.0149
Tarqui-Cumbe	$Y' = 38861.31 + 0.00603 E - 0.0042 N$	0.946	2170.61	2172.54	0.0030
Surocucho	$Y' = -61038.9 + 0.0129 E - 0.0055 N$	0.989	1805.10	1806.50	0.0067
Sayausi	$Y' = 3087.36 + 0.0304 E - 0.0023 N$	0.999	1935.53	1938.61	0.0135
Ricaurte	$Y' = -51511.1 + 0.019 E - 0.0041 N$	0.995	2378.70	2378.74	0.0070
Quinoas	$Y' = -212953.55 - 0.0172 E + 0.0023 N$	0.998	1905.08	1914.29	0.0130
Tarqui-Portete	$Y' = 103721.93 - 0.0111 E - 0.0096 N$	0.987	2256.81	2253.68	0.0048
Chirimichay	$Y' = -205478.37 - 0.0077 E + 0.0220 N$	0.996	1876.87	1876.61	0.0100
Patoquinoas	$Y' = -214584.21 - 0.0199 E + 0.0237 N$	0.998	1920.87	1932.85	0.0140
Sayausi-Matadero	$Y' = 12788.73 + 0.0314 E - 0.00343 N$	0.999	1974.09	1972.45	0.0138
Marianza	$Y' = -15440.67 + 0.0168 E + 0.00055 N$	0.993	1814.11	1815.42	0.0080
Machangara	$Y' = 26182.34 + 0.0275 E - 0.00453 N$	0.998	1914.31	1913.33	0.0120
Labrado	$Y' = -87486.72 + 0.0263 E - 0.00729 N$	0.997	2244.68	2249.65	0.0107
El Cebollar	$Y' = -28355.61 + 0.0326 E + 0.00072 N$	0.999	2157.72	2173.59	0.0130
Cumbe	$Y' = -13161.78 - 0.0027 E + 0.0017 N$	0.862	2182.57	2182.68	0.0014
Aeropuerto	$Y' = -52890.03 + 0.0279 E + 0.0036 N$	0.998	2270.03	2265.26	0.0107
Cancan	$Y' = 79074.99 - 0.0224 E - 0.00635 N$	0.996	2030.64	2030.73	0.0089
Cochapamba	$Y' = -116411.65 - 0.0045 E - 0.0126 N$	0.993	2230.21	2243.14	0.0052
Chaucha	$Y' = 10586.47 + 0.00091 E - 0.00093 N$	0.673	2206.75	2206.60	0.0006
Yanuncay	$Y' = 195823.51 - 0.000105 E - 0.02003 N$	0.995	1884.17	1882.46	0.0123

Para obtener el modelo geoestadístico que identifique el comportamiento de los datos se utiliza la técnica de interpolación Krigging de acuerdo a lo descrito en el ítem 2.7.1.1. Para las estaciones meteorológicas ubicadas en el Atlas Solar

(Imágenes N°11 y 12) se utilizó el método Kriging ordinario, el cual entrega un valor estimado de predicción, el mapa resultado se indica en la Imagen siguiente.

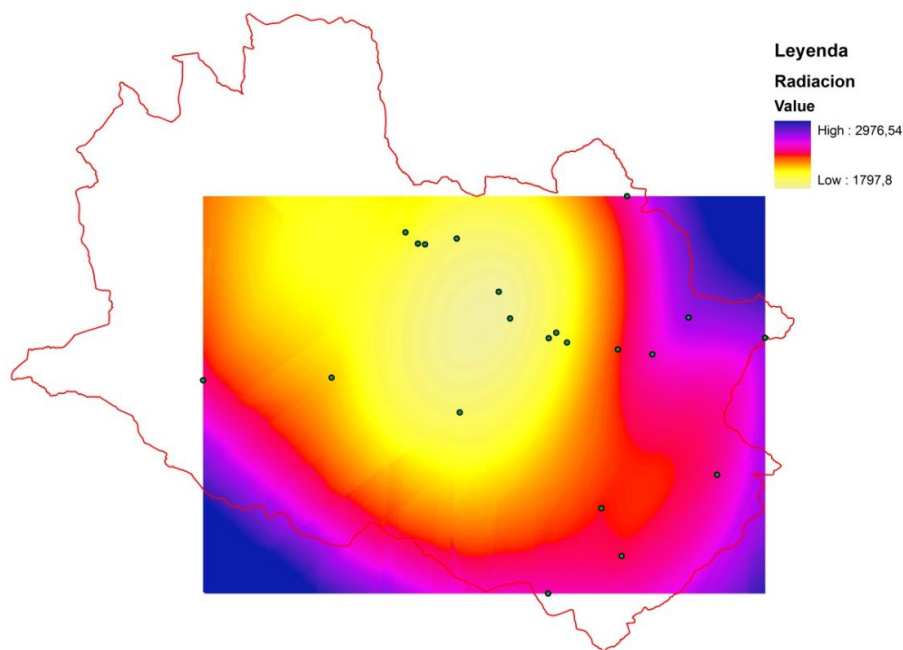


Imagen 11: Área de irradiación solar, distribución estaciones meteorológicas

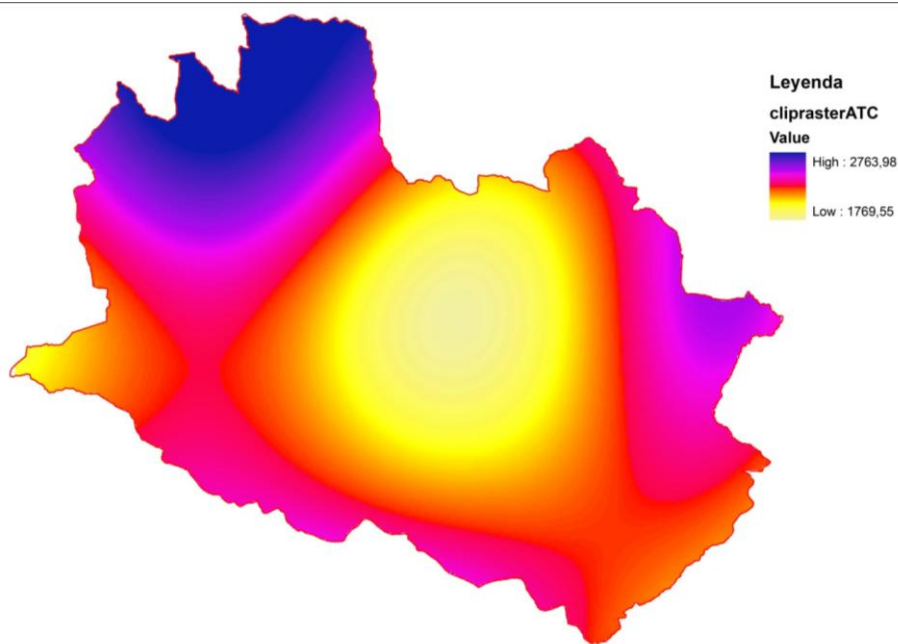


Imagen 12: Área de irradiación solar, distribución Atlas Solar



La ubicación de las estaciones en la zona responde al registro de datos de precipitación, existiendo zonas que no poseen cobertura. Hacia la zona de mayor pendiente, Rangos 4 - 5 – 6, en su mayoría no cuentan puntos de muestreo, en contraste estas zonas son aquellas con mayor valor de radiación.

El resultado indica que la predicción de radiación solar, utilizando los valores del Atlas Solar en las estaciones meteorológicas instaladas en la zona de estudio, arroja valores similares. Es decir, de contar con registros uniformes en las estaciones (Imagen 4) se dispondría de información más cercana, accesible y viable para la modelación.

### **3.2 Modelo digital de elevaciones**

La información espacial fue remuestreada a: 100x100 pixeles, 500x500 y 1000x1000 para ampliar la zona de cobertura de la original (30x30), este proceso implica pérdida de calidad de la información ya que cambia el tamaño de la celda, el tamaño del raster y la extensión del mapa es la misma. El método empleado fue el "Vecino más cercano" (Nearest) un método de interpolación rápido, ya que no cambia el valor de las celdas .

A partir del MDT se extrae el mapa de pendientes para cada remuestreo, y a cada raster obtenido se realiza la clasificación de pendientes indicada en la Tabla N° 5.



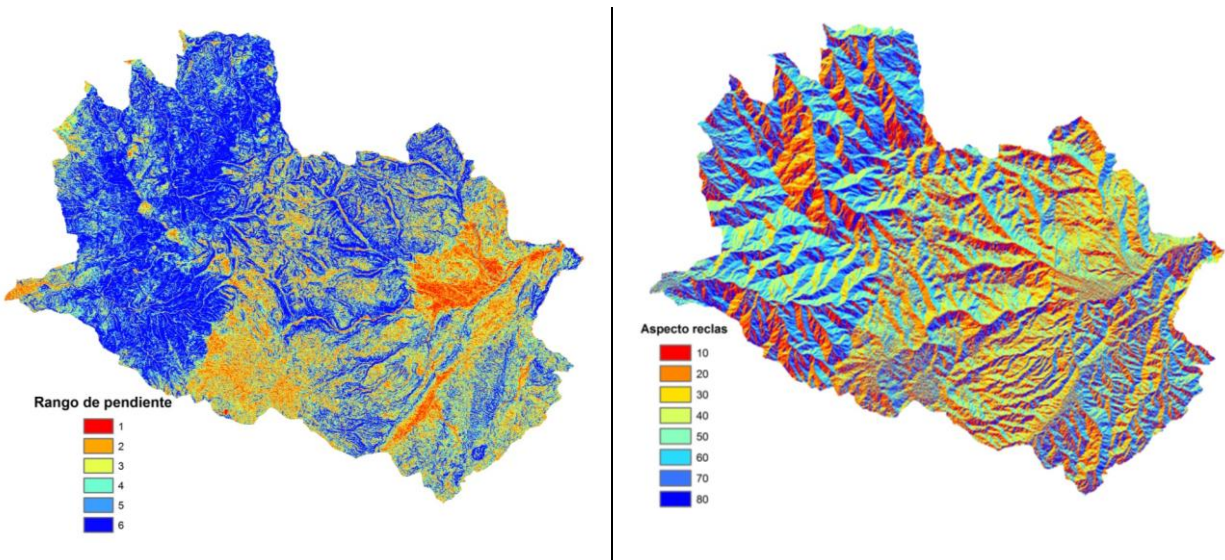


Imagen 13: Pendiente y aspecto reclasificado (100m)

De igual manera, se obtiene el mapa de aspecto a partir del raster del terreno, para cada mapa remuestreado, así mismo se reclasifican el rango de aspecto de acuerdo a la clasificación indicada en la Tabla N°6. Los mapas obtenidos se indican en la Imagen N° 13.

Como resultado de la combinación del aspecto - pendiente los datos obtenidos, de acuerdo a lo especificado en la Tabla N° 7, se obtiene el mapa de Índice Morfológico indicado en la Imagen N° 14:

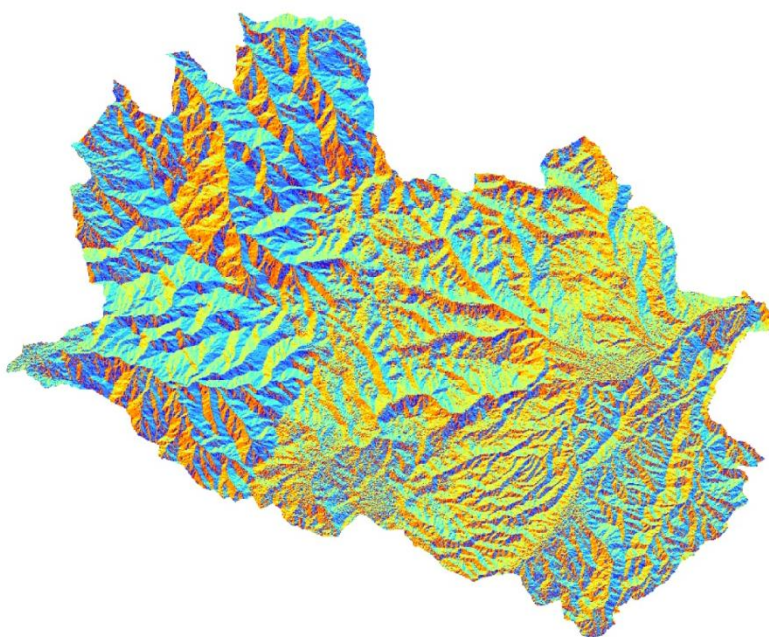


Imagen 14: Combinación aspecto y pendiente - Índice Morfológico (100)

### 3.2.1 Métodos Interpolación

Los datos son analizados para el mes de Septiembre del 2001, con duración de luz solar de 12 horas (06:00 - 18:00) de acuerdo al análisis de la imagen satelital LANDSAT obtenidas del espacio USGC en el que la imagen tiene mejor aspecto en cuanto a cobertura.

#### 3.2.1.1 Duración de horas sol

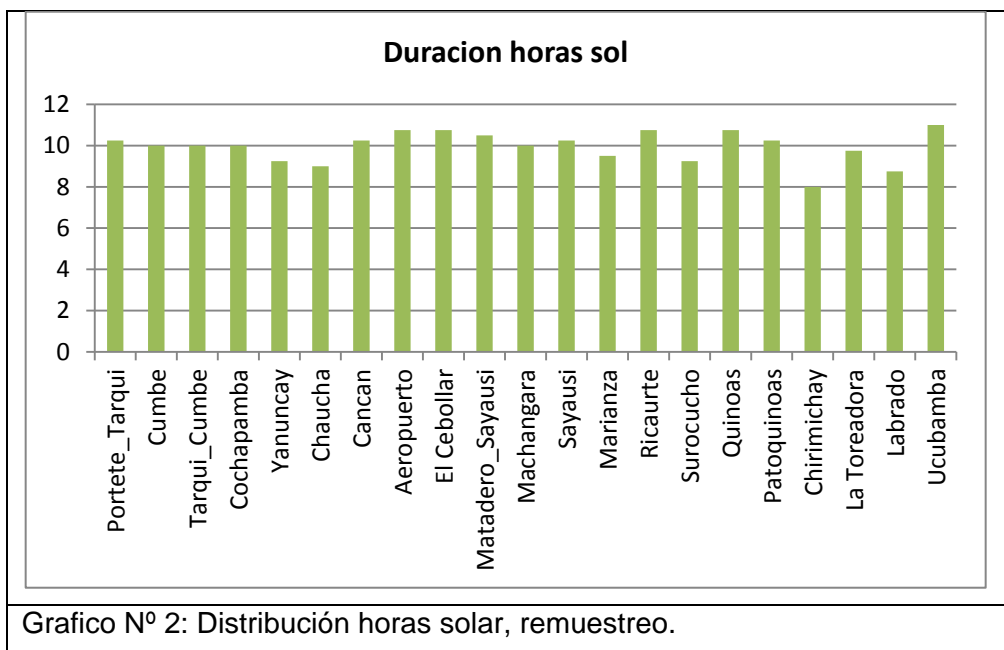
Utilizando el raster combinado de aspecto - pendiente reclasificado en los rangos indicados se obtiene el número de horas de brillo solar, indicando las zonas de mayor exposición. También se utilizó la ubicación de las estaciones meteorológicas para identificar las horas de exposición solar que pudieran ser registradas en las mismas, indicado en la Tabla N° 16.



Tabla N° 16. Duración horas sol en estaciones Cantón Cuenca

Estacion	30x30	100x100	500x500	1000x1000	Promedio	C.Var
Portete_Tarqui	9	10	11	11	10	0,0934
Cumbe	9	10	11	10	10	0,0816
Tarqui_Cumbe	8	10	11	11	10	0,1414
Cochapamba	9	10	11	10	10	0,0816
Yanuncay	7	8	11	11	9	0,2229
Chaucha	8	9	9	10	9	0,0907
Cancan	8	11	11	11	10	0,1463
Aeropuerto	10	11	11	11	11	0,0465
El Cebollar	10	11	11	11	11	0,0465
Matadero_Sayausi	9	11	11	11	11	0,0952
Machangara	9	10	10	11	10	0,0816
Sayausi	9	10	11	11	10	0,0934
Marianza	8	9	11	10	10	0,1359
Ricaurte	10	11	11	11	11	0,0465
Surocucho	7	9	10	11	9	0,1846
Quinoas	10	11	11	11	11	0,0465
Patoquinoas	9	10	11	11	10	0,0934
Chirimichay	6	7	9	10	8	0,2282
La Toreadora	9	10	10	10	10	0,0513
Labrado	8	9	9	9	9	0,0571
Ucubamba			11	11	11	0,0000

El valor de coeficiente de variación es aceptable en cuanto a los resultados obtenidos del proceso de remuestreo. En las estaciones de la Zona Urbana de la Ciudad del Aeropuerto y El Cebollar los valores obtenidos son muy semejantes, favoreciendo de esta manera la interpretación gráfica donde se observa áreas concentradas con distribuciones tendenciales. El Gráfico N° 2 indica la tendencia de las horas de sol obtenidas para las estaciones.



Con la información raster y los métodos de interpolación de Interpolación distancia ponderada (IDW), Kriging Ordinario y Vecino Natural se obtienen los coeficientes de duración solar y los mapas respectivos, cada método se indica a continuación:

a) Interpolación distancia ponderada (IDW)

Para tener una referencia del comportamiento de los datos singulares y de manera global se realiza una interpolación entre los datos, utilizando una grilla de 1000 x 1000 m que cubra todo el territorio del Cantón Cuenca y con la ubicación terrestre de las estaciones meteorológicas en la zona. En este método los datos han sido analizados con estimación lineal para disminuir la ocurrencia de error, con 15 vecinos próximos.

b) Kriging Ordinario

Es apropiado para datos con una distribución regular (isotrópica). Un proceso es isotrópico cuando es estrictamente estacionario y su variación no está asociada a una dirección particular en el rango de datos, por otra parte una variable es estrictamente estacionaria si su componente estocástico ( $X_i$ ) satisface (Hagget, Cliff and Frey, 1977) que la distribución de las  $X_i$  dependen solamente de la



posición relativa de las observaciones; o sea no existe ningún efecto estructural en los datos.

### c) Vecino Natural

El raster de interpolación es generado a partir de la misma grilla para los otros métodos, es una herramienta adecuada para la formación de poliedros o polígonos con aproximaciones de los valores cercanos reduciendo el error.

Los resultados para cada proceso se indican en la Tabla N° 17:

Tabla 17: Coeficientes Estimación duración horas sol

Celda	IDW				Kriging Ordinario				Vecino Natural			
	min	max	media	Des.est	min	max	media	Des.est	min	max	media	Des.est
30 x 30	5.44	11	9.70	0.56	8.52	10.91	9.70	0.44	5.1	11	9.70	0.73
100 x 100	7.06	11	9.97	0.61	8.89	10.98	9.97	0.41	7	11	9.97	0.67
500 x 500	8.94	11	10.45	0.41	9.51	11	10.45	0.34	7	11	10.45	0.57
1000 x 1000	9.90	11	10.67	0.27	9.86	11	10.68	0.28	8	11	10.68	0.55

Para IDW, los coeficientes obtenidos indican una tendencia uniforme de zonas con exposición a horas de sol, en sí no representan una "relación" de ajuste lineal. En el método de Kriging Ordinario, el módulo de interpolación es esférico y todos han sido evaluados con 12 vecinos próximos.

En la Imagen 15 se aprecia la duración de horas del sol durante el mes de Septiembre del año 2001, dando referencia de la distribución solar con valores mínimos de 5 horas y máximo de 11 horas para todas las resoluciones.

Los resultados indican, que para este caso, la mejor aproximación es la adoptada por el método Kriging Ordinario con distribución esférica, los valores de desviación estándar son los más bajos y el rango de duración es superior.



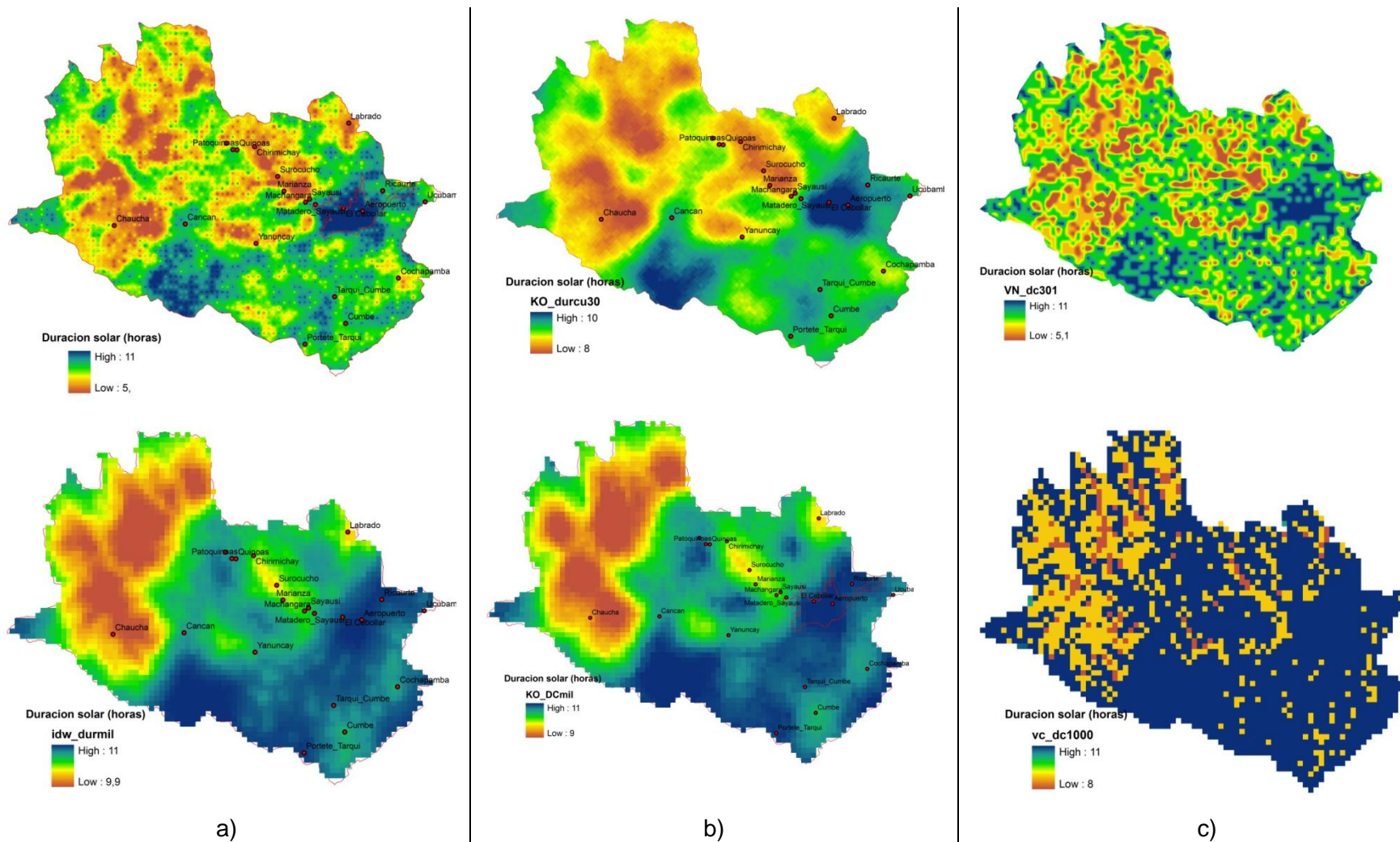


Imagen 15: Horas duración solar 30x30-1000x1000: a) IDW; b) Kriging Ordinario; c) Vecino Natural



La zona de mayor duración de horas de sol en todos los métodos resulta la zona urbana del Cantón Cuenca, correspondiente al valle donde se asienta, aquella con rangos de pendiente 1 - 25%. Hacia las afueras de la ciudad, donde las cadenas montañosas rompen la pendiente, la exposición es menor en parte por rangos de altura y en otra por mayor concentración de agentes atmosféricos que impiden la exposición a luz solar directa.

Tabla 18: Coeficientes Estimación duración horas sol

	IDW			Kriging Ordinario		
Remuestreo	A	b	$R^2$	a	b	$R^2$
30 x 30	7.19	0.260	0.853	7.511	0.225	0.853
100 x 100	6.91	0.310	0.762	7.468	0.253	0.813
500 x 500	7.15	0.320	0.60	7.533	0.283	0.65
1000 x 1000	7.73	0.278	0.50	7.643	0.287	0.50

En la Tabla 18 se puede observar la relación en el error medio cuadrático de IDW y Kriging Ordinario, muy semejantes para los remuestreos realizados.

### 3.2.1.2 Radiación solar

Para el análisis de la información resultante de la aplicación del método desarrollado por Neteler and Mitsova se utiliza el mismo proceso para la obtención de horas de luz solar, una grilla de 1000x1000 y remuestreo de 30x30; 100x100; 500x500 y 1000x1000. De igual manera se comparan los métodos de interpolación: IDW, Kriging Ordinario y Vecino cercano acorde al proceso indicado en el Diagrama N° 1.

En primera instancia se compara la información disponible del atlas, tomada por estaciones (Ítem 3.1), con la resultante de la aplicación del modelo.

Los resultados obtenidos del procesamiento del modelo digital - aspecto-pendiente - índice morfológico poseen una tendencia o comportamiento similar, siendo el de menor desviación estándar el remuestreo de 30x30, dado que influye en el cálculo



del área de influencia para la radiación solar, la tendencia y comparación se indica en el Gráfico N° 3 y Gráfico N° 4.

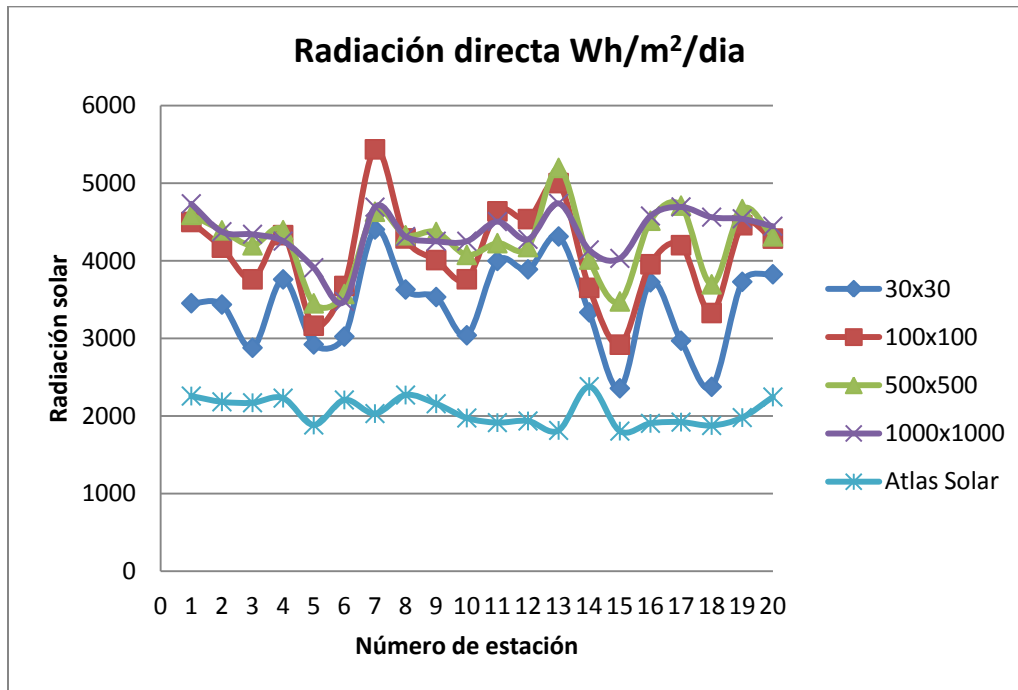


Gráfico N°3: Tendencias radiación: Atlas Solar - Estaciones

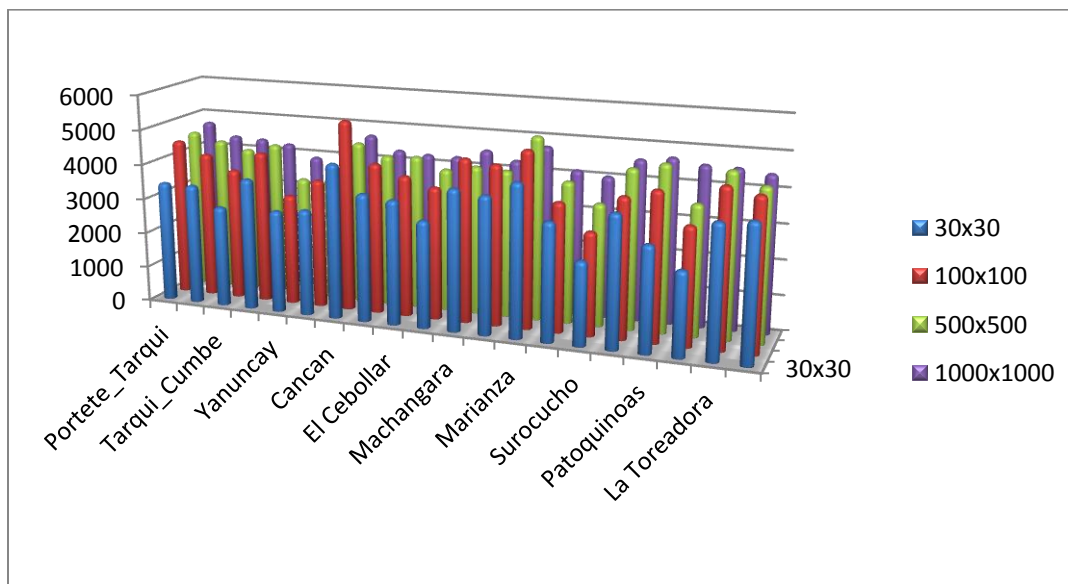


Gráfico N°4: Distribución Radiación solar en estaciones.





Los resultados indican que al aumentar el área de análisis del territorio, de 30x30m a 1000x1000m, la predicción de radiación solar incrementa en valor, esto no implica una estimación exacta ya que depende del análisis de las condiciones ambientales del medio como el efecto albedo y concentración, datos que no están disponibles.

Tabla N° 19: Valores de radiación solar, Atlas - Modelo Estaciones

N° 1	Estación	Remuestreo						Atlas Solar
		30x30	100x100	500x500	1000x1000	Promedio	Coef.var	
1	Portete_Tarqui	3453	4500	4592	4735	4320	0,136	2257
2	Cumbe	3436	4169	4392	4375	4093	0,110	2183
3	Tarqui_Cumbe	2879	3761	4200	4341	3795	0,174	2171
4	Cochapamba	3760	4330	4394	4254	4185	0,069	2230
5	Yanuncay	2922	3163	3452	3911	3362	0,127	1884
6	Chaucha	3023	3675	3572	3476	3437	0,084	2207
7	Cancan	4403	5436	4632	4691	4791	0,093	2031
8	Aeropuerto	3630	4288	4329	4313	4140	0,082	2270
9	El Cebollar	3533	4009	4371	4252	4041	0,092	2158
10	Matadero_Sayausi	3040	3762	4076	4252	3783	0,141	1974
11	Machangara	3998	4637	4227	4505	4342	0,066	1914
12	Sayausi	3889	4537	4177	4277	4220	0,063	1936
13	Marianza	4313	5001	5197	4740	4813	0,079	1814
14	Ricaurte	3335	3651	4016	4140	3786	0,096	2379
15	Surocucho	2357	2919	3476	4031	3196	0,225	1805
16	Quinoas	3723	3955	4516	4577	4193	0,100	1905
17	Patoquinoas	2970	4201	4711	4694	4144	0,197	1921
18	Chirimichay	2376	3327	3697	4562	3491	0,259	1877
19	La Toreadora	3729	4458	4666	4541	4349	0,097	1979
20	Labrado	3826	4286	4315	4445	4218	0,064	2245

El análisis correspondiente para la obtención de mapas comprende la utilización de la grilla de puntos de radiación obtenida con el modelo, ésta será sometida a procesos de interpolación con los mismos parámetros que las horas de duración solar: IDW, Kriging Ordinario y Vecino Natural en las resoluciones creadas, los resultados obtenidos se indican en la Tabla N° 20:



Tabla N° 20: Estimación radiación solar

Celda	IDW				Kriging Ordinario				Vecino Natural			
	min	max	media	Des.est	min	max	media	Des.est	min	max	media	Des.est
30 x 30	839	5678	4120	523	3134	4876	4119	333	878	5664	4121	572
100 x 100	2263	5351	4213	415	3277	4878	4214	337	1351	5713	4214	542
500 x 500	3112	5332	4381	374	3494	5013	4381	321	2627	5579	4384	442
1000 x 1000	3024	5487	4451	395	3502	5107	4451	327	2918	5632	4449	424
Atlas	1815	3842	2718	593	1835	3827	2717	586	1815	3843	2717	594

Para la aplicación del interpolador Kriging Ordinario, se seleccionó el método de ajuste Gaussiano mediante análisis del semivariograma.

En la Imagen 16 se muestra el resultado raster de radiación solar obtenido para el mes de Septiembre del año 2001 para las resoluciones de 30x30 y 1000x1000. La distribución de la "capa" de radiación es uniforme, pudiendo encontrarse valores medios altos en la zona de pendientes suaves, especialmente en el valle donde se desarrolla la Ciudad de Cuenca hacia la zona Oeste y Sur.

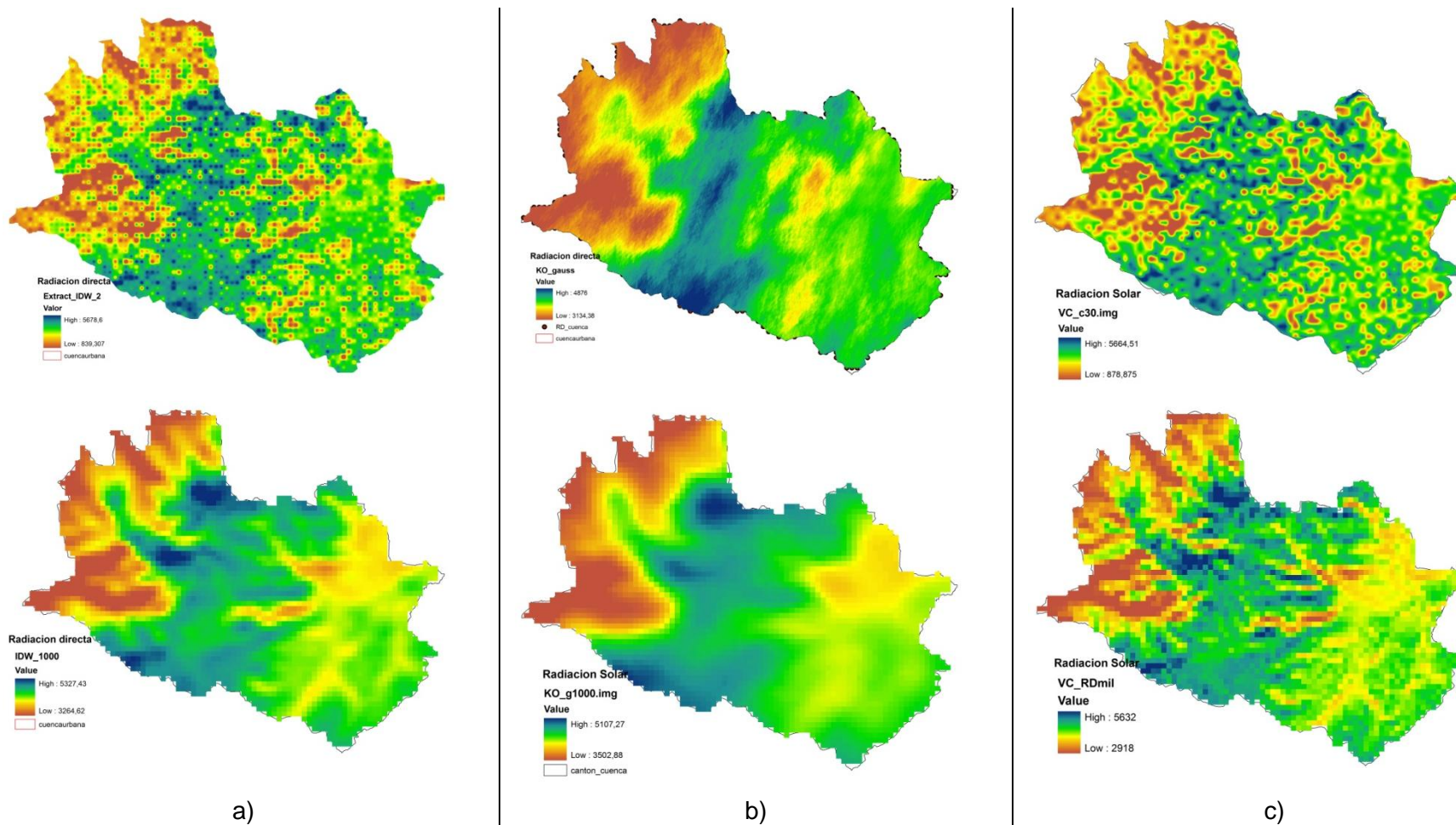


Imagen 16: Horas duración solar 30x30-1000x1000: a) IDW; b) Kriging Ordinario; c) Vecino Natural



En cuanto a las estaciones, los resultados muestran en la Tabla N° 21:

Tabla 21: Estimación radiación solar - Atlas Solar

	IDW				Kriging Ordinario				Vecino Natural			
Celda	min	max	media	Des.est	min	max	media	Des.est	min	max	media	Des.est
30 x 30	1815	3842	2718	593	1835	3827	2717	586	1815	3843	2717	594

Los resultados extraídos del mapa, indican mejor aproximación al utilizar el método de interpolación Kriging Ordinario, el semivariograma ajustado por el Modelo Gaussiano

### 3.3 Modelo heurístico

Se obtuvo el área de la zona urbana de la ciudad de Cuenca, resultando de una matriz de 2796 columnas por 2287 filas, con el tamaño de celdas de 30x30 en pixeles.

Se necesita información complementaria de parámetros climatológicos como: temperatura, efecto albedo, condiciones de humedad. De la información recopilada no se disponen de datos apropiados y continuos para establecer un modelo de cálculo de los parámetros mencionados, las estaciones meteorológicas no presentan datos continuos debiendo formularse un modelo de estimación y predicción.

De contar con la información el proceso contaría con un análisis multicriterio donde participen variables como: pendiente, aspecto, efecto albedo, humedad, uso de suelo, en condiciones similares de escala y resolución que formarían una capa por separado.

A partir de ello se realizaría una clasificación por rango de color en cada pixel, determinando para cada la misma posición, nivel digital, ésta asignación debe ser revisada estadísticamente, uno de los métodos sugeridos es el de máxima probabilidad aplicado para la generación de escenarios en mapas de cobertura de suelo.



El proceso en si resulta largo y complejo, pudiendo ser otro tema de investigación la validación de métodos para la formulación de modelos heurísticos de cálculo de variables meteorológicas.

A partir de estos resultados el modelo heurístico para este caso sirve como elemento de apoyo en la evaluación del potencial de generación distribuida con energía fotovoltaica.

### 3.4 Generación Distribuida

Tomando los valores resultantes acumulados para el mes de Septiembre (Wh/m<sup>2</sup>) se obtiene el mapa de irradiancia directa, en formato raster, que será combinada con la información de pendientes y modelo digital para determinar de acuerdo a rangos de inclinación aquellos sitios que posibiliten el aprovechamiento energético con fines de generación distribuida.

Los datos acumulados para la zona de estudio indican que es posible un análisis posterior multicriterio para el emplazamiento de centrales de generación distribuida. En la Tabla N° 22 se resumen los obtenidos con el método Kriging Ordinario, para resolución de 30x30.

Tabla N° 22: Valores acumulados mensuales radiación directa (Wh/m<sup>2</sup>)

Variable central	Unidad
Min	99052
Max	149343
Media	127739

Estos valores pueden cambiar respecto del modelo y remuestreo utilizados, pero sirve como referencia para la ubicación de potenciales estudios de caso.

El análisis multicriterio incluye datos o información en materia: eléctrica, uso de suelo, riesgos y peligrosidad, geología, hidrología, zonas urbanas, zonas de reserva, vías, entre otras que permitan establecer escenarios de análisis.



#### IV CONCLUSIONES

Considerando el objetivo de este estudio, en orden de evaluar modelos matemáticos y heurísticos para la determinación del aprovechamiento solar con fines de generación distribuida utilizando información disponible se realizó un análisis mediante herramientas SIG que facilitan el manejo y operación de datos espaciales. La zona de estudio corresponde al Cantón Cuenca mediante selección de imágenes satelitales del recipiente USGS, aquellas con claridad para procesamiento y estudio, a partir de los resultados obtenidos en base a análisis estadísticos se puede concluir lo siguiente:

- El modelo matemático desarrollado por Suri y Hofierka permite analizar desde el modelo digital del terreno, del cual se derivan mapas de pendientes y aspecto, la variación de la energía solar en la zona de estudio dando resultados fiables para la identificación de fuentes energéticas, sin embargo el método debe ser ajustado a condiciones locales con información meteorológica de apoyo con la que no se contó en este estudio.
- La información raster obtenida (MDT) de 30x30 píxeles fue re-muestreada a 100x100, 500x500 y 1000x1000, posteriormente se analizó con tres diferentes tipos de interpolación: Distancia Inversa Ponderada; Kriging Ordinario y Vecino Natural, *siendo Kriging Ordinario con ajuste de Gauss* la que mejor resultado arrojó. Es necesario indicar que la comparación se realiza entre los modelos de interpolación ya que se carece de información de campo o una base de datos histórica.
- Tomando como referencia la ubicación terrestre de las estaciones meteorológicas se aprecia que los resultados de aplicación del modelo tienen una tendencia similar a los datos obtenidos del Atlas Solar del Ecuador, es decir que de contar con información solar de registro se podría ajustar al modelo valores asumidos o por defecto que se utiliza. Resultante del análisis se desprende que la ubicación de éstas no cubre toda la zona de estudio y no



permitiría realizar un buen modelo de ajuste, su emplazamiento obedece a recopilación de información con fines hidrológicos.

- La información existente puede ser utilizada como modelos de comparación o referencia, los resultados estadísticamente presentan correlaciones y ajustes moderados, dependiendo de las necesidades de exactitud de los resultados.
- Para la determinación de áreas de generación de energía distribuida es necesario contar con una base catastral de la zona de estudio, zonas de vulnerabilidad, zonas de ocupación urbana y destinadas a conservación actualizadas; corresponden a estudios posteriores la determinación del potencial solar mediante la elaboración de escenarios con análisis multicriterio.
- La evaluación del modelo heurístico requiere de información complementaria y modelos auxiliares para la determinación de procesos multicriterios, es decir la asociación de varias condiciones ambientales para determinar zonas de iguales características, por ello es recomendable su utilización en proyectos similares para la definición de zonas aptas para generación de energía.





## V. BIBLIOGRAFIA

**Gustavo Eduardo Nofuentes Garrido:** "Contribución al desarrollo de aplicaciones foto voltaicas en Edificios"- Jaen, Julio del 2000.

**Francisco Javier Domínguez Bravo,** - La integración Económica y Territorial de las Energías Renovables y los Sistemas de Información Geográfica - Madrid, 2002

**Energía solar fotovoltaica,** Colegio Ingenieros de telecomunicación. Madrid 2002.

**J. Dréo, A. P.** (2006). Metaheuristics for Hard Optimization, Methods and case Studies. Springer-Verag Berlin Heidelberg.

**R. Jansen, O. U.** (2003). Why are spatial decision support systems not used?, some experiences from Netherlands.

**R. Jansen,** (1992). Multiobjective decision support for environmental problems. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic publishers.

**Santigosa L. M. L y L. R** (2010, January). Caracterización y evaluación de la radiación solar.

**ReVelle, J. W.** (1997). Applying mathematical programming to reserve site selection. Environmental and Modeling Assesment (pages: 167-175).

**Stewart, S B.** (2002). Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers.

**Stutzle, M. D.** (2004). Ant Colony Optimization. The MIT Press.

**Shoshtari, S.** (Octubre de 2008). Determination of free Stand-Alone Photovoltaic Potential in Germany by Gis-Based site ranking.

**Ramachandra, T.V., Shruthi B.V.,** 2005, Spatial mapping of renewable energy potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 11, Issue 7, P 1460-1480

**European Photovoltaic Industry Association,** 2007 The Photovoltaic Industry in Germany –The World's Strongest PV Cluster [Online] available at: [www.invest-in-germany.com](http://www.invest-in-germany.com). [accessed 04 September 2008].

**Julio Amador Guerra.** Análisis de los parámetros técnicos en la Aplicación de los sistemas de información Geográfica a la integración regional de las Energías renovables en la producción descentralizada de electricidad. Tesis Doctoral. Madrid 2000.

**David Mautner Himmelblau, Kennethb. Bischoff.** Análisis y simulación de procesos. Barcelona 2004.

**Ing. Agr. Javier Portillo:** Determinación de usos del suelo mediante análisis multitemporal de imágenes en los Oasis de la Provincia de Mendoza. Marzo de 2005.





**Ignacio Alonso Fernández-Coppel**, Eliecer Herrero Llorente; Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ Satellite Landsat. 2001

**Burrough P.A., 1988**, Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment, Reprinted, Oxford University Press, UK.

**ARONOFF, STAN**. Geographic Information System: A Management Perspective 1989. WDL Publications. Ottawa, Canada.

**CPIAA, Chubut 2002**. Conceptos geodésicos básicos. <http://www.agrimensoreschubut.org.ar> [En línea] 2002. [Cita: 23 Marzo 2011].

**Vazquez Maure**, Lectura de Mapas, 1973.

**Francisco Alonso Sarría**, Tutorial de Introducción a Grass,. Universidad de Murcia - Dept. Geografía y Ciencias Ambientales. 2012.

**Gary E. Sherman et all** . QUANTUM GIS, Guía de usuario e instalación. <http://www.qgis.org>

**Lic Pablo Eduardo Rial, Ing. Agr. Liliana González** . Manual de prácticas con IDRISI. Laboratorio de Teledetección y SIG. EEA Santa Cruz. 1999

**Raúl González Duque**. Python para todos. <http://mundogeek.net/tutorial-python>.

**Abella, M. A.** (2005). *Sistemas Fotovoltaicos*. Madrid: S.A.P.T. Publicaciones Técnicas.

**Alcor, E.** (2002). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. Madrid: Ed. AVM Ediciones.

**Energía Solar Fotovoltaica**. Manual del proyectista. Plan solar de Castilla y León.2004

**Medina Mena, Juan Edgardo.2001**. Evaluación de metodologías de detección de cambios de uso de suelo a través del análisis digital multitemporal de imágenes satelitales LANDSAT TM en la IX Región. [www.elgeomensor.cl/downloads/teledetección/index.php?file](http://www.elgeomensor.cl/downloads/teledetección/index.php?file). [Citado: 23 Junio 2011]

**José Ma. Fernández Salgado**. Compendio de Energía Solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica. Madrid 2008.

**Lluís Jutglar**. Energía Solar. Energías alternativas y medio ambiente. Departament de Física Aplicada i Òptica. Universitat de Barcelona 2004.

**Javier María Méndez Muñiz, Rafael Cuervo García**. Energía Solar Fotovoltaica. 4a Edición Bureau Veritas Formación.2009.

**Byrne J., Toly N., & Glover L.**, (editors) 2007 Transforming power. Energy, Environment and Society in Conflict , Energy and Environmental Policy No. 9, Transaction Publishers, New Jersey. 275 p.



**D<sup>a</sup>. M<sup>a</sup>. Amparo Nuñez A.** 2006. Tesis Doctoral. Determinación de un geoide de precisión en áreas de pequeña extensión. Aplicación en el parque Nacional de Doñana. Julio 2006.

**Atlas Solar del Ecuador.** Corporación para la Investigación Energética (CIE). Ecuador el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC). 2008.

**Universidad de Murcia,** en línea. Fotointerpretación y Teledetección: <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/>

**Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS):** <http://www.usgs.gov/pubprod/>

**Digital Globe, Satellite Imagery** and Geospatial Information Products <http://www.digitalglobe.com/?micro=true>.

**NASA. 2006.** The remote sensing tutorial.

**Chuvieco E, 1990.** *Fundamentos de Teledetección espacial* Ed. Rialp, 449 pp.

**Manuel Quiroz Hernandez.** Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), Cartografía, foto intepretación, teledetección y SIG.2011

**Glovis Visualization Viewer (USGS)** <http://glovis.usgs.gov/>

**Brizuela, Armando B; Aguirre, César A; Velasco, Inés.** Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. Argentina

**Tagestad, J. 2000.** Radiometric standardization of adjacent Landsat Thematic Mapper Image for multi-scene mosaics. master of science, Utah State University, Logan, Utah.

**Lillesand, T.M., and R.W. Kiefer.** 1987. Remote sensing and image interpretation, New York.

**Storey, J., and M. Choate,** 2000. Landsat-7 on-orbit geometric calibration and performance, Algorithms for Multi-Spectral, Hyperspectral, and Ultra-Spectral Imagery (S.S. Chen and M.R. Descour, editors), Proc. of International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, pp. 143–154.

**Becker, F., H. J. Bolle, and P. R. Rowntree,** 1988. The International Satellite Land-Surface Climatology Project, ISLSCP-Secretariat, Free University of Berlin, Federal Republic of Germany, 100p.

**J.Tucker Denelle M , Jon Dykstra.** NASA's Global Orthorectified Landsat Data Set.2004

**Neteler, M., and H. Mitsova.** 2008. Open Source GIS: A GRASS GIS approach. 3rd ed. The International Series in Engineering and Computer Science Vol. 773. 406 p. Springer, New York, USA.



**Felicísimo**, Modelos digitales del terreno, Oviedo España, 1994.

**Creus, A.** Instrumentación industrial, Marcombo, Barcelona. 1993

**Suri, M., and J. Hofierka.** 2004. A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. Transactions in GIS 8:175-190. Tickle, P.K., N.C. Coops, and S.D.

**Hofierka, J., and M. Suri.** 2002. The solar radiation model for Open Source GIS: implementation and applications. Proceedings of the Open Source Free Software GIS-GRASS users conference 2002 – Trento, Italy. 11-13 September 2002. University of Trento, Department of Civil and Environmental Engineering, Trento, Italy.

**Neteler, M., and H. Mitasova.** 2008. Open Source GIS: A GRASS GIS approach. 3rd ed. The International Series in Engineering and Computer Science Vol. 773. 406 p. Springer, New York, USA.

**Marco Bezzi, Alfonso Vitti.** A comparison of some kriging interpolation methods for the production of solar radiation maps. University of Trento - Italia. 2005

**Duffie, J.A., and W.A. Beckman.** 1980. Solar engineering of thermal processes. Wiley Inter-Science, New York, USA.

**Ball, R.A., L.C. Purcell, and S.K. Carey.** 2004. Evaluation of solar radiation prediction models in North America. Agronomy Journal 96:391-397.

**Ramon Giraldo Henao.** Introducción a la Geoestadística. Teoría y aplicación, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. 1993.

**Journel, A.G. y Ch. J. Huijbregts.** 1978. Mining Geostatistics, Academic Press, New York.

**Myers, D. E.** 1987. Optimization of Sampling Locations for Variogram Calculations. Water Resources Research. 23(3): 283(93).

**Isaaks, E. & R. M. Srivastava.** 1989. Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York.

**Petitgas, P.** 1996. Geostatistics and Their Applications to Fisheries Survey Data 5: 114-142. In: B. A. Megrey & E. Mosknes, (E). Computers and Fisheries Research. Chapman-Hall, Londres.

**Wang, T., Hamann, A., Splittlehouse, D.L., Aitken, S.N.,** 2006. Development of scalefree climate data for western Canada for use in resource management. Int. J. Climatol. 26, 383–397.

**Daly, C., Halbleib, M., Smith, J.I., Gibson, W.P., Doggett, M.K., Taylor, G.H., Curtis, J., Pasteris, P.P.,** 2008. Physiographically sensitive mapping of climatological temperature



and precipitation across the conterminous United States. *Int. J. Climatol.* 28 (15), 2031–2064.

**Hudson, G., Wackernagel, H.**, 1994. Mapping temperature using Kriging with extrernal drift: Theory and an example from Scotland. *Int. J. Climatol.* 14, 77–91.

**New, M., Hulme, M., Jones, P.**, 2000. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901–1996 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate* 13, 2217–2238.

**Apaydin, H., Sonmez, F.K., Yildirim, Y.E.**, 2004. Spatial interpolation techniques for climate data in the GAP region in Turkey. *Climate Res.* 28, 31–40.

**Spadavecchia, L., Williams, M.**, 2009. Can spatio-temporal geostatistical methods improve high resolution regionalisation of meteorological variables? *Agric. For. Meteorol.* 149, 1105–1117.

**Goovaerts, P.**, 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J. Hydrol.* 228, 113–129.

**Cressie, N.** 1993. *Statistical for Spatial Data*. John Wiley & Sons, New York.

**Deutsch, C. V. & A. G. Journel.** 1992. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York.

**Samper, F.J. & J. Carrera.** 1990. *Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

**Bogaert, P., P. Mahau & F. Beckers.** 1995. *The Spatial Interpolation of Agroclimatic Data. Cokriging Software and Source Code*. FAO, Rome.

**F. Glover and G.A Kochenberger.** *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers. 2003

**R. Church, R. Gerrard, M. Gilpin, and P. Suite.** Constructing cell-based habitat patches useful in conservation planning. *Annals of the Association of American Geographers*, 93:814-827. 2003.

**C.J. Brookes.** A parameterized region growing program for site allocation on raster suitability maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 11: 375-396. 2001a.

**K.C Gilbert, D.D Holmes, and R.E Rosenthal.** A multiobjective discrete optimization model for land allocation. *Management Science*, 31:1509-1522, 1985

**Vanegas P., Catrysse D., Van Orshoven J.** 2010 A Multiple Criteria Heuristic Solution Method for Locating Near to Optimal Contiguous and Compact Sites in Raster Maps.



**Aguilera Benavente, F.** (2006): Predicción del crecimiento urbano mediante Sistemas de Información Geográfica y modelos basados en autómatas celulares, *Geofocus* (Artículos), nº 6, p 81 - 112. ISSN: 1578-5157.

**Cannavos G.** Probabilidad y Estadística Aplicación y métodos . Ed. en español Mc GRAW - HILL/INTERAMERICANA DE MEXICO .1995.

**Burrough, P.A.** 1986. Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment. Monographs on Soil and Resources Survey. No.12. Oxford University Press. 193p.

**Oliver, M.A.** 1990. Kriging: a method of interpolations for geographical information systems. *Int. J. Geographical Information Systems*. Vol. 4(3): 313-332.

**Victor Lopez A.** Diagnóstico 2008 de Energías Sostenibles en Ecuador. Proyecto "Puentes de Energía. Energías sostenibles para la reducción de la pobreza".

**GRASS Development Team**, 2012. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.2. Open Source Geospatial Foundation.* <http://grass.osgeo.org>

**GRASS Development Team**, 2012. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Programmer's Manual. Open Source Geospatial Foundation. Electronic document:* <http://grass.osgeo.org/programming6/>

**Haggett, P. ; Cliff, A.D. and Frey, A.** 1977. Locational methods. Second Edition. Edward Arnold. London, U.K. Volume II. pp:260-605.

**Franco Aceituno Gandolfo.** Generación Distribuida a través de Sistemas Solares Fotovoltaicos. Mayo 2012.

Glosario online: Espectro electromagnético,  
<http://ec.europa.eu/health/opinions/es/lamparas-bajo-consumo/glosario/def/espectro-electromagnetico.htm>.